

Titulació:

GRAU EN ENGINYERIA ELECTRÒNICA INDUSTRIAL I AUTOMÀTICA

Alumne:

POL BARCONS BOU

Enunciat TFG / TFM:

ESTUDI: DISSENY I SIMULACIÓ DE TEIXITS
APANTALLANTS/ANTIRADIACIÓ ELECTROMAGNÈTICA PER A PROTECCIÓ

Director/a del TFG / TFM:

IGNACIO GIL GALÍ

Convocatòria de lliurament del TFG / TFM:

QUADRIMESTRE PRIMAVERA 2019-2020



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Universitat Politècnica de Catalunya
ESEIAAT

ESTUDI: DISSENY I SIMULACIÓ DE
TEIXITS APANTALLANTS/ANTIRADIACIÓ
ELECTROMAGNÈTICA PER A PROTECCIÓ

Autor:

Pol Barcons Bou

Director:

Ignacio Gil Galí

Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

30 de Juny de 2020

Declaració d'honor

I declare that,

the work in this Degree Thesis is completely my own work,

no part of this Degree Thesis is taken from other people's work without giving them credit,

all references have been clearly cited,

I understand that an infringement of this declaration leaves me subject to the foreseen disciplinary actions by *The Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTECH*.

Pol Barcons Bou

30/06/2020

ESTUDI: DISSENY I SIMULACIÓ DE TEIXITS APANTALLANTS/ANTIRADIACIÓ
ELECTROMAGNÈTICA PER A PROTECCIÓ.

Abstract

In recent years, a lot of investigations and studies have been done regarding the impact that electromagnetic radiation can have on the human body. Although these studies cannot prove the existence of a direct relationship between this radiation and unwanted biological effects on the human body, it is true that there are indications that it could relate certain levels of radiation to major health problems. In addition, it is a reality that especially with the growth of telecommunications technologies there are more and more high frequency electromagnetic signals. This implies that in certain work environments there are people who are exposed to this radiation for a long time.

As a possible solution to this problem arise the frequency selective surfaces manufactures from metamaterials. The characteristics of metamaterials, designed to have properties that cannot be found in nature, are ideal for developing textile and wearable elements with the ability to absorb radiation at a concrete frequency.

Therefore, in this study, various frequency selective surfaces are designed and optimized. The response of these surfaces is simulated in terms of absorption of electromagnetic radiation and a comparison between them is made. Although the simulations are performed in ideal conditions, it is a valuable starting point for observing the behaviour of each design for the future manufacture of these surfaces.

Resum

En els últims anys s'han realitzat una gran quantitat d'investigacions i estudis referents a l'impacte que pot tenir la radiació electromagnètica sobre el cos humà. Malgrat que aquests estudis no poden demostrar l'existència d'una relació directa entre aquesta radiació i efectes biològics no desitjats en el cos humà, és cert que hi ha indicis que podrien relacionar determinats nivells de radiació amb problemes de salut importants. D'altra banda, és una realitat que sobretot amb la creixuda de les tecnologies de telecomunicacions cada vegada hi ha més senyals de caràcter electromagnètic i d'alta freqüència. Això implica que en determinats entorns de treball hi hagi persones que es troben exposades a aquesta radiació de manera prolongada.

Com a possible solució a aquest problema sorgeixen les superfícies selectives de freqüència fabricades a partir de metamaterials. Les característiques dels metamaterials, dissenyats per tenir propietats que no es poden trobar en la naturalesa, són idònies per desenvolupar elements tèxtils i portàtils amb capacitat per absorbir la radiació en una freqüència determinada.

Per tot això, en aquest estudi es dissenyen i s'optimitzen diverses superfícies selectives de freqüència. Se simula la resposta d'aquestes superfícies en termes d'absorció de la radiació electromagnètica i es fa una comparativa entre elles. Si bé les simulacions es produeixen en condicions ideals, és un punt de partida de gran valor per observar el comportament de cada disseny de cara a una futura fabricació d'aquestes superfícies.

Índex

1 Introducció.....	x
1.1 Objectiu del treball	x
1.1.1 Diagrama de Gantt	xi
1.2 Abast del treball	xi
1.3 Requeriments del treball	xii
1.4 Utilitat del treball	xii
2 Desenvolupament	1
2.1 Antecedents i estat de l'art.....	1
2.1.1 La radiació electromagnètica i la salut.....	1
2.1.2 Metamaterials	4
2.1.2.1 Què són?	4
2.1.2.2 Classificació dels metamaterials.....	5
2.1.2.3 Propietats dels metamaterials electromagnètics	6
2.1.2.4 Aplicacions dels metamaterials	7
2.1.3 FSS (Superfícies Selectives de Freqüència)	10
2.1.3.1 Definició i breu explicació	10
2.1.3.2 Teoria d'operació de les FSS	12
2.1.3.3 Principi de les estructures periòdiques (aplicat a FSS)	13
2.1.3.4 Grating lobes	15
2.1.3.5 Efectes de càrrega dielèctrica	16
2.1.3.6 Anomalia de Wood	17
2.1.3.7 Classificació de les FSS	17
2.1.3.8 Aplicacions actuals i futures de les FSS	26
2.2 CST: Primer disseny (exemple)	31
2.2.1 Plantilla del projecte.....	31
2.2.2 Geometria del disseny	33
2.2.3 Ports i resta de l'estructura	36
2.2.4 Configuració del solver	37
2.2.5 Resultats de la simulació	38
2.3 Consideracions i condicions prèvies	41

2.4 CST: Disseny circular.....	43
2.5 CST: Disseny en creu	46
2.6 CST: Disseny hexagonal.....	49
3 Resultats	52
4 Pressupost	53
5 Conclusions i observacions.....	54
5.1 Treballs futurs	55
6 Bibliografia	56

Llista de figures

Figura 1.1: Diagrama de Gantt	xi
Figura 2.1: Classificació dels materials segons valor de la permitivitat i la permeabilitat [11].	5
Figura 2.2: Refracció en medi DPS vs. refracció en medi DNG [11].	6
Figura 2.3: Representació esquemàtica d'una guia d'ona de plaques paral·leles [11].	7
Figura 2.4: Disseny esquematitzat d'una antena elèctrica petita de metamaterials [11]. .	9
Figura 2.5: Característiques típiques de filtratge de freqüència dels elements de pedaç i obertura [15].	11
Figura 2.6: Funcionalitat d'una FSS [16].	11
Figura 2.7: Estructura periòdica que mostra l'espai entre elements i la longitud de l'element L [16].	14
Figura 2.8: Tipus d'enreixats FSS i Criteri de Grating Lobes [15].	15
Figura 2.9: Variació de la freqüència ressonant amb el gruix dielèctric per una incidència normal [15].	16
Figura 2.10: Classificació de les FSS [16].	17
Figura 2.11: Formes típiques dels elements de les FSS [16].	18
Figura 2.12: Exemples de FSS en convolució i en meandre [16].	20
Figura 2.13: Algunes geometries de FSS fractals estudiades en algunes aplicacions [16].	20
Figura 2.14: Configuració d'una FSS fractal basada en una matriu Antena-Filtre-Antena [16].	22
Figura 2.15: Exemples d'AFSS presentades en diverses investigacions [16].	24
Figura 2.16: (a) Geometria i distribució de corrent superficial simulat de la meta-skin. (b) Fotos de la meta-skin estirada i sense estirar. (c) Foto d'una vareta de niló embolicada per la meta-skin. (d) Demostració de flexibilitat [21].	25
Figura 2.17: Exemples de FSS tèxtils [16].	26
Figura 2.18: Opcions escollides a la plantilla del projecte.	31
Figura 2.19: Unitats utilitzades a CST.	32
Figura 2.20: Configuració a CST.	32
Figura 2.21: Resum de la configuració de la plantilla del projecte.	33
Figura 2.22: Geometria del disseny d'exemple [20].	33
Figura 2.23: Paràmetres definits a CST.	34
Figura 2.24: Seccions shapes i tools de CST.	35
Figura 2.25: Característiques del material Felt.	35
Figura 2.26: Geometria del disseny d'exemple creada a CST.	35
Figura 2.27: Ports del disseny.	36
Figura 2.28: Configuració de les boundaries.	36
Figura 2.29: Aspecte general de la configuració del solver.	37
Figura 2.30: Característiques del solver.	37
Figura 2.31: Simulació dels paràmetres S. Disseny d'exemple.	38
Figura 2.32: Secció Tables de CST.	39

Figura 2.33: Gràfica de l'absortivitat. Disseny d'exemple. Simulació.	39
Figura 2.34: Esquema geomètric. Disseny cercle.	43
Figura 2.35: Primeres seqüències de simulacions amb $w = 2$. Disseny cercle.	44
Figura 2.36: Segones seqüències de simulacions amb $w = 2$. Disseny cercle.	44
Figura 2.37: Gràfica de l'absortivitat. Disseny cercle. Simulació.	45
Figura 2.38: Esquema geomètric. Disseny creu.	46
Figura 2.39: Primeres seqüències de simulacions amb $N = 1$. Disseny creu.	47
Figura 2.40: Segones seqüències de simulacions amb $N = 1$. Disseny creu.	47
Figura 2.41: Gràfica de l'absortivitat. Disseny creu. Simulació.	48
Figura 2.42: Esquema geomètric. Disseny hexàgon.	49
Figura 2.43: Primeres seqüències de simulacions amb $w = 1$. Disseny hexàgon.	50
Figura 2.44: Segones seqüències de simulacions amb $w = 1$. Disseny hexàgon.	50
Figura 2.45: Gràfica de l'absortivitat. Disseny hexàgon. Simulació.	51
Figura 3.1: Gràfica comparativa de l'absortivitat dels diversos dissenys.	52

Llista de taules

Taula 2.1: Classificació dels camps electromagnètics [4].	2
Taula 2.2: Dimensions geomètriques de la cel·la unitària. Disseny d'exemple.	34
Taula 2.3: Dimensions geomètriques finals i resultats obtinguts. Disseny cercle.....	45
Taula 2.4: Dimensions geomètriques finals i resultats obtinguts. Disseny creu.	48
Taula 2.5: Dimensions geomètriques finals i resultats obtinguts. Disseny hexàgon.	51
 Taula 3.1: Taula comparativa dels resultats dels diversos dissenys.	 52
Taula 4.1: Pressupost de l'estudi	53

Nomenclatura

A	Absortivitat / Absorció
AB	Amplada de banda
AFA	Antenna-Filter-Antenna
AFSS	Active Frequency Selective Structure
C	Capacitància
CRLH	Composite Right- / Left - handed
CST	Computer Simulation Technology
d	Distància
DC	Direct current
DNG	Double Negative
DPS	Double Positive
EBG	Electromagnetic Band Gap
EHS	Electromagnetic hipersensitivity
ELF	Extremely low frequency
ENG	Epsilon Negative
f_r	Freqüència de ressonància
FSS	Frequency Selective Surface
HIS	High Impedance Surface
IF	Intermediate frequency
k	Vector de fase
L	Inductància
LHM	Left Handed Material
MNG	Mu Negative
MoM	Method of moments
MTM	Metamaterial
n	Índex de refracció
NPA	Nanoparticle array
PEC	Perfect Electric Conductor
PIN	Personal Identification Number
RCS	Radar cross-section
RF	Radio frequency
RFID	Radio Frequency Identification
S	Vector de Poynting
\hat{s}	Direcció de propagació de l'ona electromagnètica
SNG	Single Negative
SRR	Split-Ring Resonator
T	Coeficient de transmissió
TE	Transverse Electric
TM	Transverse Magnetic
UWB	Ultrawideband
WLAN	Wireless Local Area Network
WMD	Weapon of mass destruction
ϵ	Permitivitat elèctrica
Γ	Coeficient de reflexió
λ	Longitud d'ona
μ	Permeabilitat magnètica
θ	Angle de mira

1 Introducció

1.1 Objectiu del treball

Aquest projecte gira, bàsicament, al voltant del que es pot considerar un àmbit dins de l'electrònica tèxtil. Tal com mostra el títol del treball, es tracta de teixits apantallants i antiradiació, que tenen l'objectiu fonamental de la protecció humana davant de radiació electromagnètica.

En aquest context, l'objectiu del treball és, després d'haver estudiat prèviament l'estat de l'art dels metamaterials i les superfícies selectives de freqüència, així com els possibles impactes de la radiació electromagnètica en el cos humà, el disseny d'una superfície selectiva de freqüència d'altres prestacions. Aquesta superfície és el pas previ a la fabricació del teixit apantallant, i es dissenya amb el software CST (Computer Simulation Technology). Es proposen diversos dissenys diferents, i posteriorment se simula l'impacte de cada un d'ells pel que fa a l'absorció de la radiació electromagnètica. La superfície dissenyada i simulada està formada per una base i uns anells ressonants fets d'un teixit conductor metal·litzat, i entremig un substrat tèxtil no conductor de feltre. La freqüència escollida en aquest estudi és **7.9 GHz**. En aquesta freqüència i freqüències properes es desenvolupen un gran nombre d'aplicacions, però destaquen sobretot les transmissions per satèl·lit. Més endavant s'explicarà amb més detall l'àmbit d'aplicació de la freqüència de treball.

Lògicament, l'objectiu és que aquest teixit, per a la freqüència de treball, absorbeixi el senyal el màxim possible, i per tant que es redueixi el màxim possible l'efecte dels camps electromagnètics sobre el cos humà. Per això, després d'observar els resultats de les primeres simulacions, es buscarà optimitzar el màxim possible el disseny per assolir els objectius que s'acaben de descriure, és a dir, el disseny d'un teixit capaç de garantir la màxima protecció contra la radiació electromagnètica a persones que es desenvolupin en un entorn de treball amb forta exposició a aquests senyals.

1.1.1 Diagrama de Gantt

La Fig. 1.1 mostra el Diagrama de Gantt de les tasques fonamentals que ha tingut aquest estudi estructurades per setmanes.

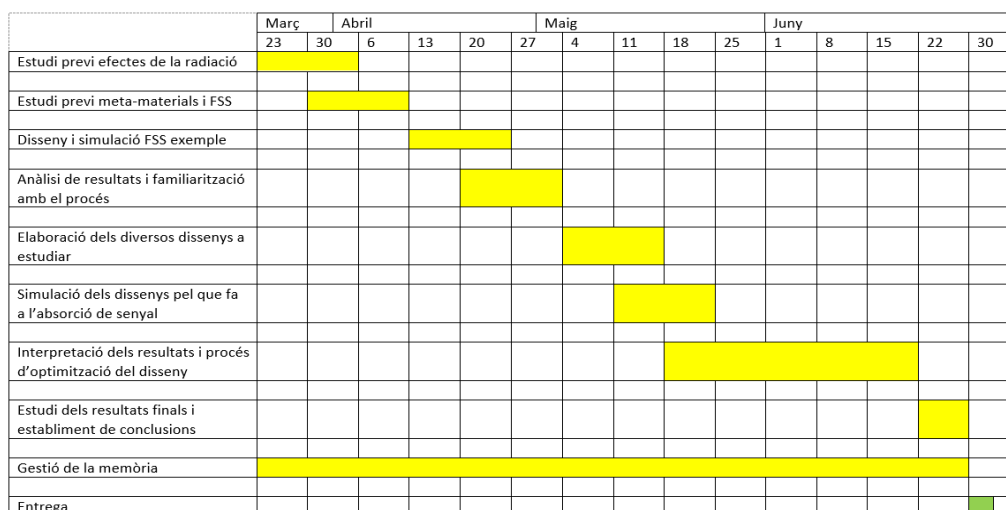


Figura 1.1: Diagrama de Gantt

1.2 Abast del treball

Com s'ha pogut veure en l'anterior apartat, aquest treball consta de diferents fases en el procés per assolir els objectius finals. Els objectius són clars, però també es tindran en compte una sèrie de consideracions prèvies per tal de familiaritzar-se el màxim possible amb els elements a partir dels quals es fabriquen els teixits apantallants (metamaterials, FSS).

Per tant, abans de començar amb el disseny i la seva posterior simulació i optimització, es dedicarà un temps a l'estudi previ de la situació actual.

Així doncs, per a les diferents fases del projecte, aquestes són les tasques que cal dur a terme per tal d'assolir els objectius:

- Fer un estudi previ dels possibles efectes de la radiació electromagnètica sobre el cos humà
- Fer un estudi previ sobre els metamaterials i les FSS (tipus, propietats, configuracions, comportament...).
- Disseny d'una cel·la unitària d'una primera FSS com a exemple i posterior simulació.
- Anàlisi de resultats i familiarització amb el procés.
- Elaboració dels diferents dissenys a estudiar.
- Simulació de la resposta de cada disseny en l'àmbit d'absorció de senyal.
- Interpretació dels resultats i optimització del disseny.
- Estudi dels resultats finals obtinguts i establir conclusions al respecte.

1.3 Requeriments del treball

- Les dades utilitzades en el projecte són de caràcter confidencial, i no podran ser divulgades o copiades sense prèvia autorització.
- De la mateixa manera, en aquest projecte no s'utilitzarà cap dada aliena sense fer referència al seu autor original.
- Els estudis previs es realitzaran recopilant informacions existents referents al tema.
- Per fer el disseny i les simulacions, s'utilitzarà el software professional CST (Computer Simulation Technology).

1.4 Utilitat del treball

Aquest projecte està enfocat a estudiar, dissenyar i simular una possible solució que pugui permetre cobrir una necessitat d'allò més important, com és la protecció del cos humà en determinades condicions i ambients de treball.

Ens trobem en un context on cada vegada es parla més dels possibles efectes perjudicials per al cos humà que pot tenir l'exposició prolongada a nivells alts de potència radiada. També és una realitat que hi ha un gran nombre de persones que es troben en ambients de treball on pateixen una exposició prolongada a aquestes radiacions. Per tant, cal tenir en compte solucions per protegir aquestes persones i entorns que es troben en condicions d'alta exposició a potència radiada, ja que trobem una gran quantitat de senyals de caràcter electromagnètic i d'alta freqüència a causa de les aplicacions de telecomunicació actuals.

Les indústries ja han començat a desenvolupar teles apantallants per exercir funcions de protecció, i d'aquesta manera fer front a aquesta problemàtica atenuant els senyals i reduint els camps electromagnètics.

Per tant, queda clar que la creació d'aquests teixits (en aquest cas, disseny i simulació) resulta d'una gran utilitat pels motius que s'han esmentat anteriorment, i suposa una gran oportunitat per al camp de l'electrònica tèxtil, ja que tenim a les nostres mans la utilització de metamaterials absorbents electromagnètics (MTM) indicats per a aplicacions on es requereixi una certa flexibilitat, i per tant adequats per adaptar-se a la vestimenta dels treballadors en risc d'exposició a la radiació.

2 Desenvolupament

2.1 Antecedents i estat de l'art

2.1.1 La radiació electromagnètica i la salut

És important entendre el context per poder entendre la necessitat i la utilitat del que es planteja en aquest treball.

En els últims anys s'han produït un gran nombre d'avenços pel que fa a les aplicacions en l'àmbit de les telecomunicacions. Això, a banda de les moltes conseqüències positives que ha aportat tecnològicament, també ha produït que en l'actualitat existeixin una gran quantitat de senyals que produeixen radiació electromagnètica d'alta freqüència. Això fa que hi hagi determinats entorns de treball en els quals les persones que hi treballen es veuen exposades a un alt nivell de potència radiada, cosa que podria ser altament perjudicial per a la salut de les persones en qüestió.

De fet, ni tan sols és necessari que el nivell de potència sigui molt elevat, sinó que l'exposició a un nivell de radiació relativament baix però prolongada en el temps podria derivar en problemes per al cos dels éssers vius.

Els camps elèctrics i magnètics variables al llarg del temps solen interaccionar amb la matèria, que està formada per partícules amb càrrega elèctrica. Això es produeix especialment amb la matèria que constitueix els sistemes biològics, com el cos humà. Aquestes interaccions amb el cos humà poden ser altament perjudicials pel que fa a òrgans teixits. En aquest sentit, l'any 1935, el professor Harold Saxton Burr i el filòsof Filmer Stuart Cuckow Northrop van examinar i publicar els efectes que podrien tenir els gradients estables de tensió en diversos sistemes biològics. Aquesta línia va ser seguida per molts científics, que van arribar a la conclusió que aquests gradients de tensió són capaços de provocar canvis dràstics en els organismes, com lesions locals i canvis en el creixement [1].

Totes les persones es troben exposades a una combinació de camps elèctrics i magnètics dèbils. De fet, en el mateix organisme es produeixen corrents elèctrics minúsculs, com els impulsos dels nervis [2]. Aquests camps, per sobre de determinats llindars, poden produir efectes biològics. Entenem com a efecte biològic una resposta a un estímul o canvi en el medi [2], i aquestes respostes no han de posar necessàriament en risc la salut de les persones. De moment, l'exposició a curt termini a nivells de camp presents en la vida quotidiana no ha demostrat tenir efectes perjudicials, i hi ha directrius que limiten l'exposició a nivells de camp més alts, que

podrien ser més perillosos. Per tant, el centre d'atenció es troba sobretot en els possibles efectes que pugui tenir una exposició baixa però prolongada en el temps.

En els últims anys s'han fet una gran quantitat d'investigacions al respecte. S'han posat sobre la taula qüestions com la possibilitat de desenvolupar diversos tipus de càncer, alteracions del sistema nerviós i desordres psicològics, alteracions del sistema visual i auditiu, del sistema endocrí, del sistema immunològic, del sistema cardiovascular, possibles problemes en la reproducció i el desenvolupament, problemes cerebrals i afectació sobre les cèl·lules en general, entre d'altres [1, 3, 4, 5].

Per poder abordar el tema, és interessant primer de tot conèixer quins tipus de camps electromagnètics hi ha en funció del seu rang de freqüència. Està resumit a la Taula 2.1.

Tipus de camp	Rang de freqüència	Exemples
Estàtic	0 Hz	Ressonàncies magnètiques, instrumentació científica, electròlisi industrial, dispositius de soldadura
ELF (Freqüència extremadament baixa)	0-300 Hz	Línies electròniques, aplicacions domèstiques, motors elèctrics, dispositius de soldadura
IF (Freqüència intermèdia)	300 Hz - 100 kHz	Dispositius antirobatori, sistemes de control de mans lliures, lectors de targetes, detectors de metalls, dispositius de soldadura
RF (Radiofreqüència)	100 kHz - 300 GHz	Telefonia mòbil, forn de microones, radars, transceptors de ràdio, emissió i televisió, algunes proves d'imatge

Taula 2.1: Classificació dels camps electromagnètics [4].

S'han realitzat investigacions de cada un d'aquests tipus de camps, encara que s'ha posat força més èmfasi en alguns que en altres. Els camps electromagnètics de radiofreqüència, a causa de l'immens creixement de les tecnologies de

telecomunicacions, són els més estudiats actualment. A grans trets aquestes són les conclusions pel que fa a cada tipus de camp:

- **Camps estàtics.** Hi ha relativament pocs estudis al respecte, i la majoria estan enfocats a problemes oncològics o reproductius [4]. Fins ara no s'ha pogut demostrar l'existència d'efectes de salut a llarg termini associats a aquest tipus de camps. Sí que es parla de possibles efectes aguts, que són més perillosos en l'exposició a camps de més de 8T [6].
- **ELF.** S'ha establert que amb una exposició aguda a nivells elevats de radiació es poden produir a curt termini estimulacions neurals i musculars, així com alteracions del sistema nerviós central [7]. A llarg termini, alguns estudis determinen que els camps ELF podrien tenir relació amb la leucèmia infantil. De totes maneres, les evidències no són prou clares, i encara ho són menys en l'estudi de la relació entre els camps ELF i altres problemes de salut [4, 7].
- **IF.** S'han realitzat pocs estudis al respecte i sobretot encarats a exposicions agudes. Es coneixen efectes biològics d'aquest rang de freqüències, com escalfament i estimulació nerviosa [5]. Les dades i estudis que hi ha fins al moment són certament massa limitades per avaluar els riscos en aquest rang de freqüències, sobretot en exposicions a llarg termini.
- **RF.** És el rang de freqüències més controvertit i del que es realitzen més investigacions, ja que en els últims anys s'han produït molts avenços en els sistemes de telecomunicacions que treballen a aquestes freqüències. L'ús de telèfons mòbils és el centre de moltes investigacions. La majoria d'estudis afirmen que no està demostrat que hi hagi efectes nocius de l'exposició a aquestes freqüències si la radiació es troba per sota d'uns límits determinats. S'ha posat sobre la taula que els nens i els adolescents puguin ser més sensibles que els adults a aquests camps. A més, preocupa que els més joves tindran una exposició acumulada molt més gran a llarg termini que els adults d'avui en dia [4].

Malgrat la falta d'evidències clares, s'ha associat l'exposició a aquestes freqüències sobretot amb problemes tumorals del cervell i el sistema auditiu, així com amb problemes reproductius i símptomes relacionats amb desordres psicològics i del sistema nerviós. De totes maneres, es considera que falten investigacions i estudis epidemiològics, sobretot pel que fa a intensitats més altes i a exposicions a llarg termini [4, 5].

HIPERSENSIBILITAT ELECTROMAGNÈTICA

Una altra de les grans incògnites que ens trobem és la possibilitat que hi hagi persones més sensibles que altres als camps electromagnètics. En aquest context apareix el concepte de la hipersensibilitat electromagnètica (EHS).

Algunes persones descriuen símptomes com mals de cap, nàusees, marejos, cansament, problemes cutanis, depressió i alteracions del son, entre d'altres, i manifesten que poden estar associats amb l'exposició a camps electromagnètics [5, 2].

Malgrat que aquests símptomes poden afectar notablement a la qualitat de vida de la persona en qüestió, no hi ha evidències científiques que demostrin que l'exposició a nivells de camp normals provoqui símptomes a curt termini, ni tampoc sembla existir cap mecanisme biològic que expliqui la hipersensibilitat. Alguns autors afirmen que una de les causes podria ser l'exposició a metalls pesants [1]. En tot cas, s'estan realitzant investigacions més detallades, com es descriu a [8].

Tot el que s'ha comentat ens porta a plantejar-nos la importància que té aplicar algun tipus de protecció per evitar el màxim possible efectes indesitjables de la radiació. Evidentment, l'exposició no és la mateixa en tots els entorns de treball, la qual cosa ens porta a preguntar-nos si podem aplicar alguna solució que proporcioni aquest tipus de protecció sigui quina sigui la freqüència dels senyals. Aquí apareixen els teixits apantallants (entenent com a teixits apantallants aquells que fan un efecte d'apantallament, és a dir, són capaços d'atenuar una força o una interacció), que esdevenen una solució interessant en aquest aspecte. Com s'ha comentat anteriorment, les indústries ja han començat a desenvolupar teles apantallants per fer funcions de protecció, atenuant els senyals i reduint els camps electromagnètics. Tenim la possibilitat d'utilitzar metamaterials absorbents electromagnètics (MTM), adaptables a aplicacions que requereixen flexibilitat, i per tant ideals per adaptar-se a la indumentària de treball de les persones exposades a la radiació.

2.1.2 Metamaterials

2.1.2.1 Què són?

Els metamaterials són materials artificials dissenyats, que tenen propietats úniques o inusuals les quals no poden trobar-se o són molt difícils de trobar a la naturalesa [9]. El seu ús sol donar-se sobretot en l'entorn de l'electromagnetisme, on han permès superar algunes de les limitacions existents quan s'utilitzen materials naturals. Aquests materials han permès, per exemple, absorbir radiació electromagnètica de manera molt més eficient, millorar notablement el rendiment de sistemes d'antenes miniaturitzades i focalitzar la llum en àrees força més petites que anteriorment.

Estan basats en estructures periòdiques, i les propietats de cada metamaterial tenen el seu origen en l'estructura dissenyada i no en la seva composició. Per tant,

aquestes estructures es dissenyen en funció de com es vol que es comporti el metamaterial.

D'alguna manera, en l'àmbit de l'electromagnetisme el que es pretén és manipular les ones electromagnètiques, és a dir, si som capaços de canviar les propietats dels materials, podríem ser capaços de canviar el comportament d'aquestes ones (per exemple canviant paràmetres com la permitivitat, la permeabilitat o l'índex de refracció).

2.1.2.2 Classificació dels metamaterials

Es poden fer diverses classificacions dels metamaterials en funció de quins siguin els criteris de classificació que es fan servir. Si el criteri és el valor de la permitivitat ϵ i la permeabilitat μ , es pot establir la següent classificació [10, 11]:

- **Double Positive (DPS).** Tenen tant la permitivitat com la permeabilitat més gran que 0.
- **Single Negative (SNG).** Tenen permitivitat negativa o bé permeabilitat negativa, però només una de les dues. En funció de si el valor negatiu és ϵ o μ , trobem el tipus **Epsilon Negative (ENG)**, i **Mu Negative (MNG)**.
- **Double Negative (DNG o LHM).** Tenen els dos valors negatius, tant la permitivitat com la permeabilitat.

Aquesta classificació es mostra a la Fig. 2.1.

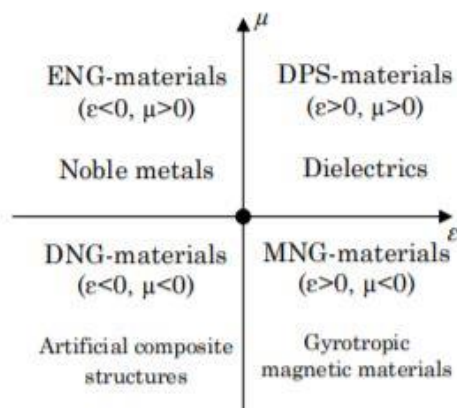


Figura 2.1: Classificació dels materials segons valor de la permitivitat i la permeabilitat [11].

Més enllà dels valors de la permitivitat i la permeabilitat, podem trobar més tipus de metamaterials electromagnètics, com els EBG (*Electromagnetic Band Gap*), o els metamaterials Bi-isotròpics i Bi-anisotròpics [10].

2.1.2.3 Propietats dels metamaterials electromagnètics

La resposta que proporciona un material davant les ones electromagnètiques ve determinat principalment per dos paràmetres, que són la permitivitat elèctrica ϵ i la permeabilitat magnètica μ . En els metamaterials, tal com s'ha vist anteriorment, aquests paràmetres poden tenir valors negatius. Això fa que l'índex de refracció del metamaterial també sigui negatiu, ja que es calcula com $n = -\sqrt{\epsilon\mu}$. Aquest índex negatiu fa que els rajos de llum incidents es corbin cap al costat contrari al que seria normal, i es presenta una refracció negativa de la radiació electromagnètica [12]. A la Fig. 2.2 pot observar-se la diferència entre la refracció en un medi DPS (permitivitat i permeabilitat positives) i la refracció negativa en un medi DNG (permitivitat i permeabilitat negatives, i per tant índex de refracció negatiu).

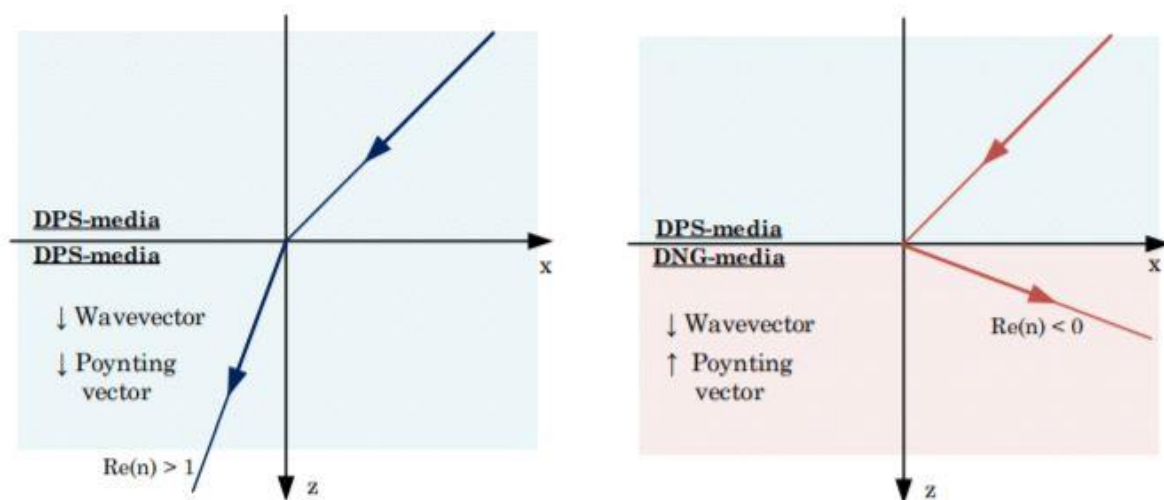


Figura 2.2: Refracció en medi DPS vs. refracció en medi DNG [11].

El fet que ϵ i μ siguin negatives fa que, en canviar el seu signe a les quatre equacions de Maxwell, el vector de fase i el vector de Poynting estiguin en direcció oposada, tal com està indicat a la Fig. 2.2. El resultat d'això és que les ones es mouen de forma inversa (la fase sembla ondular-se cap enrere mentre que l'energia es propaga cap endavant). El vector de fase especifica la direcció de la velocitat de fase, mentre que el vector de Poynting indica la direcció de propagació de l'energia [13].

L'efecte Doppler invers és una altra de les propietats interessants dels metamaterials, de la qual encara no hi ha informació gaire extensa, però estan sota investigació les possibles aplicacions d'aquest fenomen.

Els metamaterials també fan possible l'efecte Cherenkov invers. Això significa que una partícula carregada que passa a través d'un metamaterial emet llum des d'un costat darrere de la partícula. En els materials convencionals, aquesta llum s'emet des de davant de la partícula. Ja que la radiació de Cherenkov es produeix quan una partícula carregada es mou en un medi més ràpid que la llum en aquest mateix medi, una possible aplicació podria ser la construcció d'un detector de Cherenkov per identificar partícules carregades de diferents velocitats [13].

Com es pot veure, els metamaterials tenen propietats interessants que no es troben en materials presents a la naturalesa, i que tenen possibles aplicacions que es veuran a continuació.

2.1.2.4 Aplicacions dels metamaterials

Gràcies a la seva interacció anormal amb els camps electromagnètics, els materials permeten estudiar punts de vista alternatius i poc estudiats, que poden resoldre problemes de forma més senzilla i permetre superar les limitacions de les tecnologies existents fins al moment. Això es produeix sobretot en l'àmbit de l'electromagnetisme i de l'òptica, tot i que també han permès solucionar problemes en altres àmbits. A continuació s'exposen algunes de les aplicacions més importants dels metamaterials actualment.

Guies d'ona i derivats

Tal com s'explica a [11], es va descobrir que les propietats electromagnètiques no convencionals dels metamaterials s'observen quan un material es combina amb un altre que té almenys una de les constants del material de signe contrari. Per exemple combinant un material DNG i un DPS, dels que s'ha parlat anteriorment. La Fig. 2.3 mostra la representació esquemàtica d'una guia d'ona de plaques paral·leles formada per l'aparellament de materials DNG i DPS:

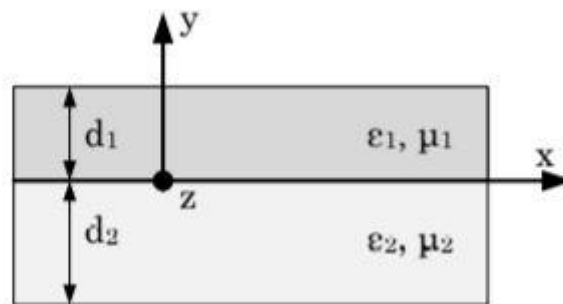


Figura 2.3: Representació esquemàtica d'una guia d'ona de plaques paral·leles [11].

A [14] es descriu un estudi sobre una guia d'ona amb metamaterials. S'explica que es pot dissenyar la resposta electromagnètica d'un metamaterial per tal d'obtenir les propietats de guia d'ona desitjades. Es proposen guies d'ona amb un nucli dielèctric i un revestiment fet d'un metamaterial amb pèrdues. En aquestes guies es troba una gran diversitat de modes, amb diverses característiques d'atenuació i de dispersió que no es troben en les guies d'ona fetes amb un dielèctric i un metall. S'observa que existeixen híbrids de modes guiats ordinàriament i modes de superfície per a amplis intervals de freqüència. En alguns modes, l'atenuació canvia ràpidament en un rang de freqüències reduït i pot ser útil en aplicacions de filtratge de freqüència. També es troba que una guia d'ona formada per un dielèctric i un metamaterial pot

suportar modes de superfície de baixes pèrdues si les pèrdues magnètiques en el metamaterial es poden reduir, per exemple, amb metamaterials superconductors.

Metamaterials absorbents

Es fan servir per absorbir de manera eficient radiació electromagnètica en bandes de microones i terahertz, i normalment estan formats per una capa d'un metamaterial i una làmina de metall separades per un dielèctric. Pel que fa a la part del metamaterial, se solen utilitzar molt les estructures SRR i els seus derivats, sobretot en els absorbidors de microones.

Aquests absorbidors són compactes i fàcils de fabricar amb independència de la polarització a la banda ampla de freqüència [11]. També són més adaptables i eficients respecte a altres absorbidors més convencionals, tot i que per garantir una alta proporció d'absorció de la radiació electromagnètica es requereix un disseny eficaç [10].

També s'han desenvolupat dispositius capaços d'absorbir energia electromagnètica en determinats punts i transformar-la en calor. Els absorbidors que poden ajustar la freqüència de funcionament es poden utilitzar com a detectors o sensors sensibles espectralment, sobretot en alguns bolòmetres i detectors piroelèctrics.

Antenes

En l'àrea de les comunicacions trobem una altra de les aplicacions. Els metamaterials s'utilitzen per augmentar i millorar el rendiment dels sistemes d'antenes miniaturitzades. Un dels objectius principals que es busca és augmentar el guany de l'antena. En les petites antenes convencionals, la major part de la longitud d'ona reflecteix el senyal de tornada cap a la font, però l'antena feta de metamaterial té una estructura que emmagatzema i torna a irradiar l'energia, cosa que permet que es comporti com una antena més gran [10].

Les antenes convencionals d'ones de fugues (*leaky-wave*) tenen com a inconvenient principal l'exploració només de mig espai, és a dir, només tenen capacitat de rastreig cap endavant. Utilitzant metamaterials se supera aquesta limitació i també s'assoleix la capacitat de rastreig cap enrere. Per tant, combinant les antenes convencionals i les capacitats dels metamaterials, s'aconsegueixen antenes amb capacitat d'exploració en totes direccions [13].

L'estructura del substrat d'aquestes antenes normalment és homogeni i està format per SRRs, anells quirals o metasolenoides, i se solen fabricar les matrius de les antenes basades en estructures CRLH [11].

A [10] podem veure una breu descripció d'alguns tipus diferents d'antenes fetes amb metamaterials, i la Fig. 2.4 mostra el disseny esquematitzat d'una antena de metamaterials.

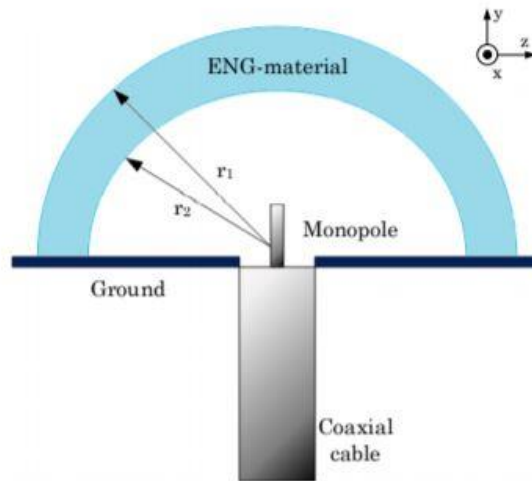


Figura 2.4: Disseny esquematitzat d'una antena elèctrica petita de metamaterials [11].

Súper lents

Una de les aplicacions més conegudes dels metamaterials, aquesta en l'àmbit de l'òptica. Totes les lents conegudes avui en dia que utilitzen materials naturals no poden focalitzar la llum en una àrea més petita que la longitud d'ona quadrada de la llum que s'utilitza per examinar-la. Això és conegut com el límit de difracció. Aquestes lents convencionals només poden focalitzar les ones propagadores, cosa que deriva en una imatge imperfecta de l'objecte. Els detalls de l'objecte més petits que una longitud d'ona, portats per les ones evanescents, es perden a causa de la forta atenuació que experimenten aquestes ones en viatjar de l'objecte a la imatge, i és aquesta pèrdua de l'espectre evanescent el que constitueix l'origen del límit de difracció. Les lents basades en metamaterials, però, aconseguixen una imatge perfecta provocant que es restaurin les ones evanescents que emanen de la font. Per tant, la resolució de la lent experimenta una millora molt gran.

Com a conclusió, es pot dir que gràcies a les lents planes perfectes fetes amb metamaterials, és possible una resolució per sota de la longitud d'ona, així com superar el límit de difracció [13].

Altres aplicacions dels metamaterials, més o menys relacionades amb les que s'han explicat i anteriorment, són [10]:

- **Detectors WMD.** L'exèrcit i les forces aèries utilitzen metamaterials per detectar la presència d'explosius químics, agents biològics i contaminació.
- **Submarins invisibles.** Mitjançant metamaterials es pot manipular fàcilment la longitud d'ona del so, que és molt més gran que la de la llum. Això s'utilitza en les forces navals per fer els submarins indetectables al sonar de l'enemic. També s'utilitzen els metamaterials per crear sales insonoritzades amb una acústica perfecta.

- **Electrònica revolucionària.** Els enginyers de l'exèrcit utilitzen metamaterials com a dispositius de comunicació per tal de construir equips fotònics petits i ràpids, de manera que en un futur s'utilitzi la llum en lloc de l'electricitat.
- **Filtratge de llum i so.** S'utilitzen per controlar senyals de llum o de so i millorar la resolució de l'ultrasò. Sobretot s'utilitza en diagnòstics mèdics, supressió del so i proves de materials no destructius.
- **Biosensors.** Són eines molt importants en àrees com la supervisió ambiental, la seguretat alimentària i el diagnòstic de malalties en la investigació de fenòmens biològics. S'han començat a utilitzar metamaterials en tecnologies de detecció de sensibilitat biològica.

2.1.3 FSS (Superfícies Selectives de Freqüència)

2.1.3.1 Definició i breu explicació

En el context d'aquest treball, els apantallaments giren al voltant del que es coneix com a superfícies selectives de freqüència. En alguns estudis se les considera un tipus de metamaterial.

D'acord amb [15], una superfície selectiva de freqüència és una estructura que normalment consisteix en elements periòdics bidimensionals, i que presenta propietats de filtratge de freqüència similars a les dels filtres de freqüència que es troben en els circuits tradicionals de radiofreqüència. Aquí, la matriu periòdica de ranures (o obertures) actua com un filtre passa-banda, és a dir, passen ones a la freqüència ressonant de les ranures però es rebutgen a freqüències més altes i més baixes. Per contra, la matriu de pedaços (*patches*) conductors actua com un filtre eliminador de banda, és a dir, rebutjant les ones a les freqüències ressonants dels pedaços però passant-les a freqüències més altes i més baixes. Aquestes característiques estan representades a la Fig. 2.5. En el cas de les reixetes independents i primes sense dielèctrics, l'acció de filtratge del pedaça i l'acció de l'obertura són exactament complementàries. Aquesta propietat condueix a diverses aplicacions, de les quals es parlarà més endavant.

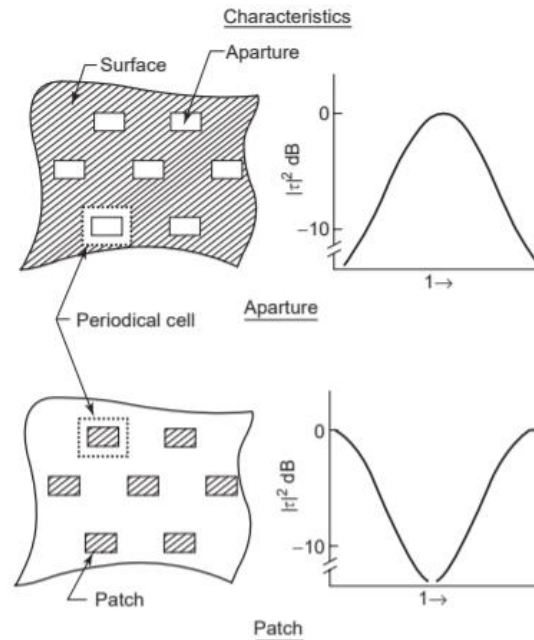


Figura 2.5: Característiques típiques de filtratge de freqüència dels elements de pedaç i obertura [15].

Tal com s'explica a [16], en els rangs de freqüències òptiques i de microones, l'ús de superfícies selectives de freqüència és l'acció més adequada per a operar sobre els sistemes de processament de senyals. Aquestes estructures s'utilitzen per modificar les ones electromagnètiques incidents en les superfícies i proporcionar efectes de transmissió, reflexió i dispersió. Es pot veure la funcionalitat d'una FSS a la Fig. 2.6.

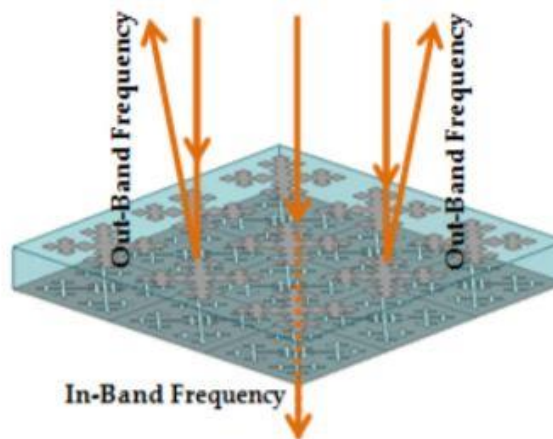


Figura 2.6: Funcionalitat d'una FSS [16].

Normalment el disseny consta de matrius metàl·liques periòdiques d'elements en un substrat dielèctric. El canvi de l'ona transmesa en comparació amb l'ona incident pot ser tant en amplitud com en fase, però en qualsevol cas es pot introduir una certa selectivitat cap a la polarització incident per tal de millorar les irregularitats del patró d'emissió.

Algunes de les millors propietats de les FSS són el perfil baix, la periodicitat reduïda, polarització dual, estabilitat angular, resposta de freqüència amb múltiples pols i facilitat de fabricació. Tot i això, és un repte per als dissenyadors aconseguir un disseny òptim amb totes les propietats que s'acaben de mencionar [16].

Per tal de realitzar el filtratge de freqüència, l'energia ha de ser absorbida i/o redirigida. Pel que fa a l'absorció, els dispositius es fan propensos per absorbir incorporant materials amb pèrdues, i aquesta absorció es pot amplificar encara més si s'afegeixen estructures ressonants. Respecte a redirigir l'energia, es fa mitjançant interferències i difracció [17].

2.1.3.2 Teoria d'operació de les FSS

Segons la teoria de circuits, les estructures FSS tenen molts punts en comú amb els filtres de microones. Segons les característiques de filtratge de les FSS, es pot establir la següent classificació:

- Filtres FSS **passa-baixos**. Permeten passar a un rang de freqüències baixes a través de l'estructura, evitant i desviant un rang més alt de freqüències.
- Filtres FSS **passa-alts**. Funcionen de manera contrària als filtres passa-baixos, aplicant el principi de Babinet.
- Filtres FSS **eliminadors de banda**. Bloquegen les freqüències no desitjades, incloses dins d'un rang determinat.
- Filtres FSS **passa-banda**. Contràriament als filtres eliminadors de banda, deixen passar les freqüències dins d'un rang específic.

Com s'ha comentat anteriorment, el disseny de les FSS sol constar de matrius periòdiques de pedaços metàl·lics i/o ranures gravades en un material dielèctric. La selecció adequada dels elements de la matriu, forma, dimensions i material del substrat és la part més important del procés de disseny d'una FSS [16].

Com se segueix explicant a [16], quan les ones electromagnètiques incideixen sobre una estructura FSS, provoquen corrents elèctrics als elements de la matriu, i l'amplitud d'aquests corrents ve definit pel nivell d'energia. Aquests corrents generats també funcionen com a fonts electromagnètiques i creen camps addicionals dispersos que, combinats amb els camps electromagnètics incidents, constitueixen el camp resultant als voltants de la FSS. Per tant, es poden obtenir els corrents i les característiques del camp requerides mitjançant elements dissenyats i crear la resposta del filtre.

Els elements de peça són dissenyats per actuar com un filtre eliminador de banda per a les ones del pla que entra, i funcionen com a superfícies que reflecteixen completament una banda estreta de freqüència. Per la seva part, els elements

d'obertura (ranures) tenen característiques de filtre passa-banda, i es comporten com superfícies transparents per les ones electromagnètiques incidents dins de la banda de freqüències de treball. El professor Ben A. Munk de la Universitat Estatal d'Ohio explica amb tota mena de detalls la teoria operacional de les estructures FSS a [18].

Els pedaços de la FSS creen resistència i inductància, mentre que els buits entre els elements FSS generen capacitància. Un principi electroestàtic simple s'aplica per manipular la significació física d'aquests valors passius per a diferents elements FSS, i per tant es crea la resposta de filtre requerida mitjançant la combinació d'aquests elements capacitius i inductius. De totes maneres, qualsevol canvi en els paràmetres dimensionals de la FSS condueix a una variació equivalent en els valors de L i C, és a dir, inductància i capacitància. Físicament, quan una cel·la unitària d'una FSS és il·luminada per una ona electromagnètica, pot convertir-se en un circuit de ressonància equivalent [16]. La freqüència de ressonància és definida per (2.1), on L i C representen respectivament la inductància equivalent i la capacitància d'una cel·la unitària de FSS:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.1)$$

En el procés de disseny de la FSS, és totalment decisiva l'elecció d'un element de matriu adequat [16]. S'han implementat diverses geometries per a les cel·les unitat, algunes de les quals són més conegudes i fàcilment controlables. Més endavant es veurà més informació sobre aquests elements de matriu.

2.1.3.3 Principi de les estructures periòdiques (aplicat a FSS)

Tal com explica Munk a [18], hi ha dues maneres principals de trobar la impedància i les propietats de dispersió d'estructures periòdiques. La primera és el mètode d'impedàncies mútues, que està vinculat al mètode dels moments (MoM), i la segona és l'anomenat mètode espectral o plantejament d'expansió d'ona plana. El disseny de l'estructura periòdica d'una FSS pot basar-se en el teorema de Floquet. Per definició, una estructura periòdica ha de ser infinita en extensió. Una matriu plana que és infinita en les direccions x i z amb un espai idèntic entre elements ($D_x = D_z$) es considera com a configuració veritablement periòdica. Això es pot veure a la Fig. 2.7.

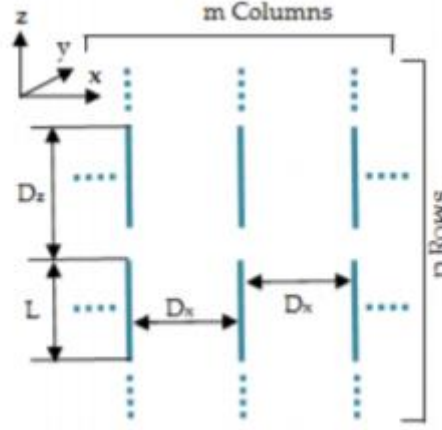


Figura 2.7: Estructura periòdica que mostra l'espai entre elements i la longitud de l'element L [16].

Llavors, la matriu és afectada per una ona electromagnètica incident que es propaga en una direcció \hat{s} determinada, definida per (2.2).

$$\hat{s} = \hat{x}s_x + \hat{y}s_y + \hat{z}s_z \quad (2.2)$$

L'amplitud dels corrents sobre tot l'element serà igual, mentre que la fase del camp electromagnètic incident coincidirà amb les fases d'aquests corrents. Segons el teorema de Floquet, els corrents de la columna m i la fila n són definits per (2.3).

$$I_{mn} = I_{0,0} e^{-j\beta m D_x s_x} e^{-j\beta n D_z s_z} \quad (2.3)$$

Si s'utilitza la llei d'Ohm per a l'element de referència 0, 0 es defineix (2.4),

$$V^{0,0} = \left[Z_L + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Z_{0,mn} e^{-j\beta m D_x s_x} e^{-j\beta n D_z s_z} \right] I_{0,0} \quad (2.4)$$

i la impedància d'escaneig de la matriu és definida per (2.5).

$$Z^{0,0} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Z_{0,mn} e^{-j\beta m D_x s_x} e^{-j\beta n D_z s_z} \quad (2.5)$$

2.1.3.4 Grating lobes

Es coneix com a *grating lobes* als feixos de radiació secundaris no desitjats que es produeixen en angles amb interferències constructives d'ordre superior quan la mida de l'enreixat es fa gran elèctricament [15]. Ja que els elements d'una matriu periòdica es comporten de manera similar a la matriu convencional, la mida màxima de l'enreixat per evitar els *grating lobes* hauria de seguir la mateixa norma que regeix una antena convencional de matriu. Una regla general per evitar aquest fenomen és que la mida de l'enreixat ha de ser inferior que una longitud d'ona del cas normal incident (angle incident 0°). Per a grans angles incidents, l'espai hauria de mantenir-se per sota de la meitat de la longitud d'ona de l'espai lliure. A la Fig. 2.8 s'enumeren diversos tipus d'enreixat i la mida màxima que poden tenir per evitar els *grating lobes*. Els requisits d'espai indicats eviten que pic del *grating lobe* entri a l'espai real. De totes maneres, com s'explica a [15], per evitar la pèrdua d'energia la mida de l'enreixat hauria de ser aproximadament dos terços o menys de la indicada a la Fig. 2.8.


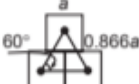

Lattice Type	Maximum Spacing	$\theta_0 = 0^\circ$	$\theta_0 = 45^\circ$
 Square spacing	$\frac{a}{\lambda_0} < \frac{1}{1 + \sin \theta_0}$	$\frac{a}{\lambda_0} < 1$	$\frac{a}{\lambda_0} < 0.59$
 Triangular spacing	$\frac{a}{\lambda_0} < \frac{1.15}{1 + \sin \theta_0}$	$\frac{a}{\lambda_0} < 1.15$	$\frac{a}{\lambda_0} < 0.67$
 Brick spacing	$\frac{a}{\lambda_0} < \frac{1.12}{1 + \sin \theta_0}$	$\frac{a}{\lambda_0} < 1.12$	$\frac{a}{\lambda_0} < 0.65$

Figura 2.8: Tipus d'enreixats FSS i Criteri de Grating Lobes [15].

La relació entre l'espai de l'enreixat i els angles dels feixos de llum incidents i difractats es coneix com a *Grating Equation* o *Grating Lobe Condition*, i és la que es veu a (2.6),

$$\begin{aligned}
 k_0 n \sin \theta_m &= k_0 n_{\text{inc}} \sin \theta_{\text{inc}} - \frac{2\pi m}{d_x} \\
 n \sin \theta_m &= n_{\text{inc}} \sin \theta_{\text{inc}} - m \frac{\lambda_0}{d_x}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

on

n = índex de refracció al voltant de l'ordre difractat

n_{inc} = índex de refracció al voltant de l'ona aplicada

d_x = espai entre elements

$m = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$

2.1.3.5 Efectes de càrrega dielèctrica

Els dielèctrics sovint s'utilitzen per fer funcions d'estabilització de la freqüència de ressonància d'una FSS amb la direcció de l'angle incident o per suport estructural [15]. En aquest sentit, les freqüències ressonants disminueixen a mesura que el gruix del dielèctric augmenta, com mostra la Fig. 2.9.

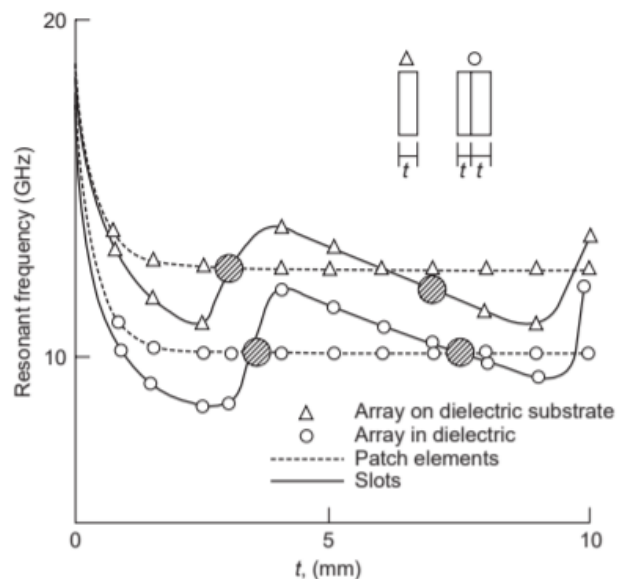


Figura 2.9: Variació de la freqüència ressonant amb el gruix dielèctric per una incidència normal [15].

L'efecte de càrrega dielèctrica d'una matriu també depèn de l'angle incident i de les polaritzacions d'ona. Per una incidència TE (transversal elèctrica) la ressonància disminueix a mesura que augmenta el gruix dielèctric, d'una manera semblant al que passa amb la incidència normal. En el cas de la incidència TM o transversal magnètica, es produeix una reducció important en l'efecte de càrrega dielèctrica a mesura que s'acosta l'angle de Brewster (63°). En aquest angle, la interfície aire/dielèctric no reflecteix les ones incidents i la freqüència de ressonància es comporta de manera similar a la de la matriu de pedaça. De fet, es perd l'estabilitat angular de les matrius de ranures per a un gruix dielèctric superior a 1 mil·límetre. De totes maneres, si el dielèctric té un gruix múltiple de quart de longitud d'ona, el canvi de freqüència ressonant torna a ser estable [15].

Tal com s'explica a [15], una de les aplicacions més importants de la càrrega dielèctrica és el disseny de FSS multibanda. Per a una aplicació FSS multibanda,

generalment la freqüència més alta determina l'espai en els elements o la mida de l'enreixat.

Per a una aplicació FSS el substrat dielèctric ha de ser prou prim per evitar que es generin ones superficials, sobretot per a grans angles d'incidència. El fenomen conegut com a anomalia de Wood, el qual es veurà en la secció següent, no s'eliminarà en una quadrícula incrustada en dielèctrics, només serà augmentat en freqüència si el dielèctric és prim. A més, la possible aparició de *grating lobes* dependrà de la mida física de l'enreixat [15].

2.1.3.6 Anomalia de Wood

Es coneix com a Anomalies de Wood a les variacions ràpides en la intensitat dels diversos ordres espectrals difractats en certes bandes estretes de freqüència, i van ser observades per primera vegada l'any 1902 en l'espectre de difracció de reixes òptiques. Aquestes anomalies normalment solen produir-se a freqüències pròximes o superiors a la freqüència ressonant d'una estructura periòdica, i tenen un impacte significatiu en el disseny d'estructures periòdiques utilitzades en filtres solars i radoms FSS. La freqüència de les anomalies de Wood disminueix a mesura que augmenta el gruix del dielèctric. A més, per a una matriu de ranures a l'espai lliure, l'anomalia de Wood es produirà just per sota de la freqüència a la qual comença a propagar-se un *grating lobe* en l'espai real, que per a una incidència normal en una matriu rectangular es produirà primer quan la mida de l'enreixat és d'una longitud d'ona [15].

2.1.3.7 Classificació de les FSS

A [16], diversos representants de la University of Science and Technology Beijing i del Beijing Engineering Research Center for Cyberspace Data Analysis and Applications estableixen una classificació de les FSS basant-se en diferents criteris. Aquests criteris són l'element de la matriu, el disseny de l'estructura i les aplicacions, tal com es pot veure a la Fig. 2.10.

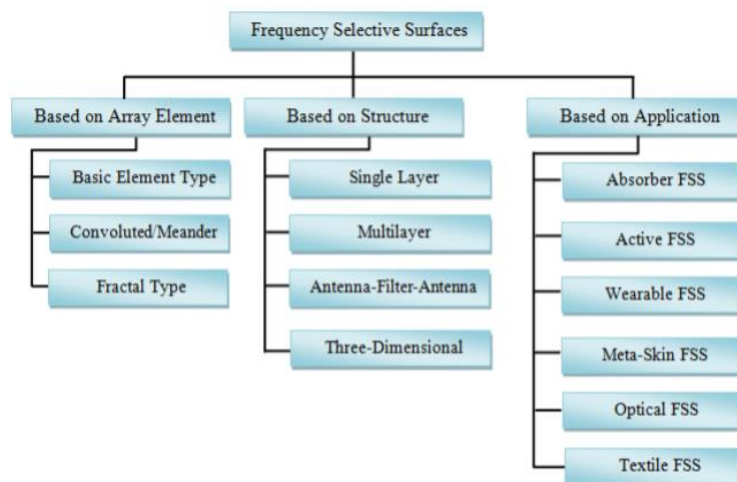


Figura 2.10: Classificació de les FSS [16].

La classificació és la següent:

Classificació segons l'element de la matriu

Tipus d'element bàsic

En termes generals, s'han establert quatre tipus bàsics de grups d'elements. Aquests grups es mostren a la Fig. 2.11.

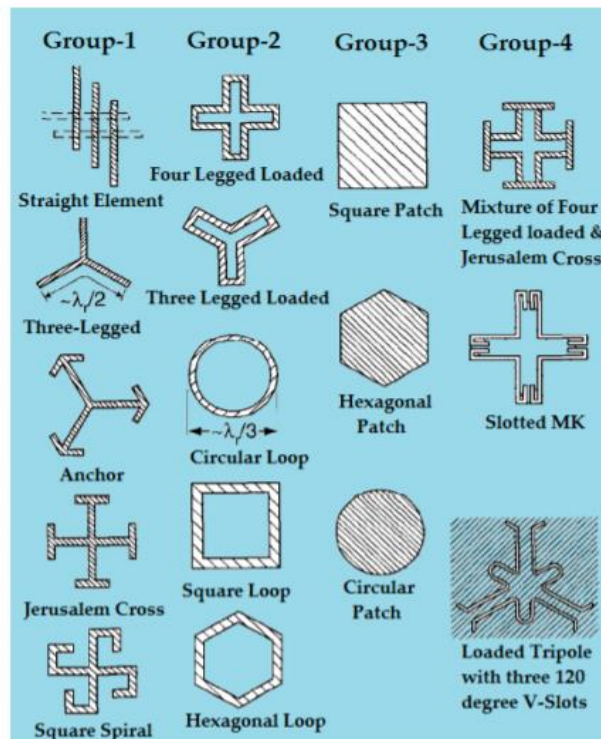


Figura 2.11: Formes típiques dels elements de les FSS [16].

Depenent de les potencials aplicacions, s'escull un element de matriu d'algun d'aquests grups o una combinació d'aquests. Un bon element de matriu ha de presentar una resposta de ressonància estable amb la variació dels angles d'incidència. Sovint, escollir un element del segon grup amb una àrea de *loop* gran sol ser beneficiós, a més de millorar l'amplada de banda.

Es pot veure que hi ha diverses opcions com els elements de tres i quatre potes, el circular, el quadrat i l'hexagonal, i aquest últim resulta ser especialment útil per a aplicacions de banda ampla. Quan el perímetre de l'element del *loop* esdevé igual a una longitud d'ona completa, la FSS assoleix la ressonància. Pot aconseguir-se un rang ampli d'amplada de banda canviant la forma d'aquests elements.

No obstant això, es pot variar l'amplada de banda de gairebé tots els tipus de FSS alterant l'espai entre elements, que ha de ser petit en termes de longitud d'ona. Si aquest espai entre elements és més gran que la meitat de la longitud d'ona, es produirà una aparició precoç de *grating lobes*.

Depenent de la permitivitat efectiva i amb un espai entre elements suficientment gran, la FSS ressona quan la circumferència (perímetre) és igual a la longitud d'ona. L'amplada de banda augmenta a mesura que es redueix l'espai entre elements. D'altra banda, a una certa distància més propera això augmenta la capacitància entre elements, impulsant així la freqüència ressonant cap al costat inferior. Per tal de poder resoldre aquesta discrepància i recuperar la freqüència ressonant desitjada, la circumferència de l'element s'ha de reduir. En aquest sentit, els elements del primer grup estan força a prop dels del segon, i amb un disseny adequat d'aquests elements del primer grup, l'espai entre elements es pot reduir raonablement per experimentar una banda extremadament llarga. D'aquesta manera, es pot retardar significativament l'aparició de *grating lobes*. Respecte al tercer grup, aquests consisteixen en elements amb l'interior sòlid, i se solen utilitzar principalment en combinació amb elements complementaris adjacents.

La característica general de les FSS és que assoleixen ressonància a la freqüència desitjada només quan la mida del pedaç o la ranura en la cel·la unitària és almenys de l'ordre de mitja longitud d'ona. De totes maneres, aquesta limitació es pot superar minimitzant les dimensions elèctriques de l'element constituent a escala de sublongitud d'ona per assegurar la insensibilitat davant les variacions de l'angle d'incidència i la polarització.

FSS en convolució o en meandre

Hi ha algunes aplicacions que requereixen FSS miniaturitzades, especialment en radoms on la flexibilitat és un repte per als dissenyadors. En les FSS amb dimensions elèctriques relativament petites, es pot reduir la mida de la cel·la unitària sense afectar a l'estabilitat angular. Hi ha estudis on es demostra que les estructures FSS quadrades de *loop* en convolució poden presentar una millor estabilitat en la polarització en comparació amb un element simple.

També s'ha estudiat que les cel·les unitàries més petites es troben menys distorsionades per a una quantitat determinada de curvatura. El concepte d'elements en convolució per reduir la mida de la unitat és un enfocament constructiu per reforçar les estructures corbes i aïllar de forma evident els efectes dels *grating lobes* de la ressonància fonamental. Tanmateix, cal tenir en compte la limitació de fabricació.

Actualment se sol utilitzar aquest tipus de FSS per aïllar selectivament la freqüència en finestres d'oficina i augmentar la fiabilitat de les comunicacions mòbils. Aquests tipus de matrius són una elecció molt atractiva per a aplicacions intel·ligents que requereixen una alta estabilitat en el rendiment en multibanda o banda dual. D'altra banda, alguns dels principals problemes en la utilització de FSS en convolució o en meandre són la reduïda controlabilitat independent, una elevada pèrdua d'inserció i la dificultat de fabricació i implementació.

La Fig. 2.12 mostra alguns exemples d'aquest tipus de FSS.

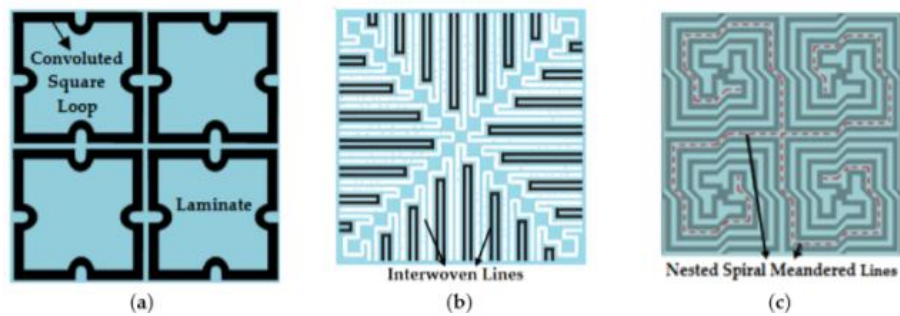


Figura 2.12: Exemples de FSS en convolució i en meandre [16].

FSS fractals

Actualment s'està realitzant una recerca significativa sobre el disseny i desenvolupament de noves FSS basades en la teoria de la geometria fractal, ja que aquesta té algunes característiques que resulten molt atractives. Les FSS amb elements fractals es van proposar originalment per retallar la mida de l'estructura aplicant les corbes d'ompliment d'espai de Hilbert i Minkowski. Posteriorment, les noves investigacions han aportat noves perspectives als enginyers per investigar possibles configuracions fractals il·limitades que no havien existit anteriorment.

Les FSS fractals ocupen una àrea molt més reduïda a causa del seu ús eficient de l'espai, i alguns atributs importants d'aquestes matrius inclouen metodologies eficients per reduir la mida de l'element de la matriu, comportament multibanda, dissenys de lòbuls de banda baixa i una millora de la formació d'algorismes de feixos ràpids.

Les FSS fractals són conegudes per crear una resposta i compacitat multibanda. La resposta de freqüència multibanda de les fractals de Sierpinski s'ha utilitzat de forma lucrativa en el passat per dissenyar FSS de banda dual. A més, s'ha estat investigant l'impacte sobre la resposta de freqüència mitjançant el factor d'escala, el nivell d'iteració i l'amplada del pedaç metàl·lic. S'ha demostrat que amb l'augment de la longitud elèctrica del pedaç fractal es produeix una disminució de la freqüència de treball i, a causa d'això, s'observa una disminució de les dimensions estructurals. La Fig. 2.13 mostra algunes de les típiques geometries de FSS fractals que s'estan investigant per a diferents aplicacions.

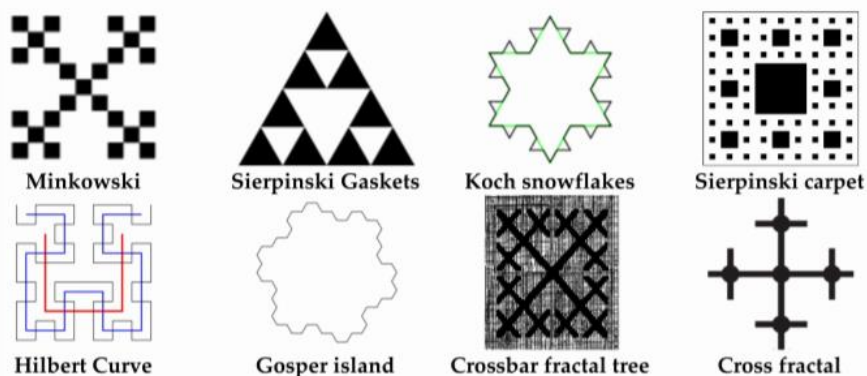


Figura 2.13: Algunes geometries de FSS fractals estudiades en algunes aplicacions [16].

Classificació segons l'estructura

FSS d'una capa (*Single layer*)

Aquests tipus de FSS es componen d'una matriu bidimensional d'elements ressonants periòdics. Com ja s'ha comentat les FSS actuen com a filtres passa-banda o eliminadors de banda basant-se en les característiques exhibides pels elements de pedaç o les ranures. Malgrat les FSS d'una capa amb aquesta resposta del filtre han estat utilitzades en un ampli rang d'aplicacions, el seu ús potencial està restringit per l'espai limitat disponible per a la cel·la unitària. Per tant, cal disposar d'una gran quantitat d'elements de mida considerable i crear una FSS finita amb millors resultats. A més, un espai gran entre elements i la mida d'aquests elements pot resultar en un gran desafiament, sobretot a l'hora de realitzar superfícies corbes. Per aquesta raó ha aparegut la concepció d'una FSS d'elements de matriu miniaturitzada, que millora l'estabilitat angular de l'estructura. Aquests elements miniaturitzats provoquen que les bandes de treball se separin de la regió dels *grating lobes*, tal com es defineix pel període de la matriu.

FSS multicapa (*Multilayer*)

Un repte important en la teoria de les FSS és la limitació de la seva amplada de banda operativa. Particularment, resulta molt difícil millorar el rendiment de l'amplada de banda de les FSS d'una capa, i això fa que no siguin les més adequades per a certs tipus d'aplicacions. Aquest problema es pot resoldre utilitzant elements ressonants de geometria complexa o mitjançant FSS multicapa. La primera opció normalment resulta en una resposta multibanda i una millora general de l'amplada de banda, però sense millorar-la per a una ressonància única i ocasionalment fins i tot disminuir-la. Per tant, l'alternativa de les FSS multicapa és l'alternativa més adequada per augmentar l'amplada de banda de ressonància única.

Pot obtenir-se una resposta de banda ampla en el rang de freqüència desitjat mitjançant estructures FSS multicapa, a causa de la discontinuïtat proporcionada per les capes.

FSS Antena-Filtre-Antena (AFA)

En la línia de les limitacions d'altres tipus de FSS que es comenten anteriorment respecte a la demanda d'amplada de banda, s'han proposat les FSS basades en una matriu Antena-Filtre-Antena, que es consideren de perfil baix i s'utilitzen per aconseguir una selectivitat d'alta freqüència. Consisteixen en elements d'antena de recepció i transmissió curosament dissenyats com a blocs de la FSS, acoblats als elements ressonants o no ressonants de l'estructura per sintetitzar una resposta de filtre en una certa banda de freqüència. L'ús de l'element ressonant permet una resposta arbitràriament superior. Les principals preocupacions són la periodicitat de la FSS, el requisit d'una amplada de banda més gran, una estabilitat angular elevada, característiques de multipol i un rendiment estable. La miniaturització pot ajudar a posposar l'aparició de *grating lobes* i, per tant, disminuir la distorsió de la FSS. A la

Fig. 2.14 es mostra la configuració d'una FSS fractal basada en una matriu Antena-Filtre-Antena.

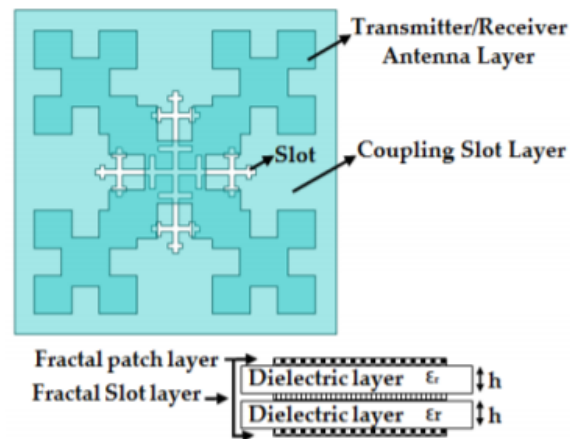


Figura 2.14: Configuració d'una FSS fractal basada en una matriu Antena-Filtre-Antena [16].

FSS Tridimensionals (3D FSS)

De forma general, les qualitats que es requereixen en una FSS són amplada de banda i passatge ràpid, així com insensibilitat als angles incidents i polaritzacions de les ones electromagnètiques entrants en certes aplicacions, com reducció de RCS, detecció de terahertz, compatibilitat electromagnètica i telecomunicacions. Malauradament, els elements periòdics bidimensionals (pedaç/ranures) i les FSS planars amb una sola capa o multicapa no són prou eficients per realitzar de manera simultània totes les funcions esmentades. Recentment s'han introduït les FSS 3D per tal de superar aquestes limitacions.

De la mateixa manera que en les FSS bidimensionals, els mètodes aplicats per deduir les característiques de filtratge d'una FSS 3D solen ser el circuit de ressonància equivalent LC, tall de guia d'ona o l'acoblament multicapa. No obstant això, per crear un disseny FSS 3D s'introdueixen estructures o cavitats addicionals entre capes planes de FSS 2D en lloc de l'estructura convencional multicapa. Malgrat que tenen el problema de tenir una fabricació i desenvolupament complexos, aquestes configuracions 3D ofereixen una elecció supèrflua de mètodes de disseny i, per tant, adaptables a característiques de rendiment avançades pel que fa a l'estabilitat de la resposta de banda, forma més nítida, flexibilitat superior i rebuig més ampli fora de banda.

Classificació segons les aplicacions

FSS absorbents de microones

De forma general, una FSS genera bones característiques de reflexió en un rang específic de freqüències en la seva banda de rebuig. Per a algunes aplicacions específiques en el rang de microones cal reduir aquesta reflexió tan forta, i és en

aquest punt on apareix el concepte de FSS absorbent de microones. Generalment, els senyals reflectits s'absorbeixen a la banda de rebuig a través de la introducció d'alguns elements absorbents en la matriu del disseny de la FSS. Per tant, en lloc de reflectir les ones electromagnètiques incidents, es fan servir principalment els elements absorbidors de microones. Aquests elements són especialment útils en aplicacions militars, per tal d'aconseguir que els avions o objectius siguin indetectables per als radars.

Si Γ i T són els coeficients de reflexió i transmissió respectivament, el factor d'absorció A es pot calcular mitjançant (2.7).

$$A = 1 - |\Gamma|^2 - |T|^2 \quad (2.7)$$

Seguint en la línia d'aplicacions, és comú integrar FSS amb característiques de reflexió i/o transmissió a les parets d'alguns edificis per tal d'augmentar la seguretat en la seva xarxa local (WLAN). Es permet que passin senyals de telefonia mòbil, bloquejant els senyals WLAN.

En els últims anys s'han investigat les FSS amb pèrdues per fer funcions absorbents. En els dissenys, els reptes més grans són assolir un disseny compacte amb un espai reduït entre la FSS i les làmines resistives, una resposta estable per a angles d'incidència elevats i les dues polaritzacions.

Les FSS absorbents de microones s'utilitzen de manera freqüent en tecnologies furtives o tecnologies que han de ser sigil·loses. Com s'ha comentat anteriorment, aplicacions com helicòpters, avions, aeronaus o míssils requereixen absorbents de banda ampla altament eficients per disminuir la probabilitat de ser detectats. Els objectius principals d'aquest tipus d'absorbents, per tant, són l'absorció ideal i l'absorció multibanda. Actualment, les FSS amb pèrdues fabricades amb un element resistiu i un substrat dielèctric són la millor opció per a un absorbent de banda ampla, ja que el seu disseny és fàcil i fa ús d'elements senzills.

FSS actives

Generalment, una vegada construïdes les FSS passives convencionals (que consisteixen en ranures i/o pedaços conductors en un substrat dielèctric), resulten ser inflexibles en el seu rendiment a causa de les seves característiques físiques permanents després de la fabricació. Tot i que el seu disseny i fabricació són relativament fàcils, certes aplicacions requereixen una modificació de la seva resposta en freqüència. Una solució a això és una estructura selectiva de freqüència activa (AFSS), que pot exercir un potencial control sobre el rendiment electromagnètic per mitjà de l'ajustament dinàmic de les excitacions exteriors com el rang de tensió DC, la resistència a la llum o l'energia del camp. A diferència de les característiques invariables de les FSS passives, les propietats electromagnètiques de les AFSS, com la freqüència de ressonància i la polarització, es poden tornar a configurar durant el seu funcionament. Això es fa afegint elements actius a l'estructura, tals com interruptors, díodes PIN i altres tipus de díodes. La resposta de la FSS canvia quan

es modifica l'estat d'aquests dispositius actius (per exemple d'ON a OFF), que depèn de la font externa de polarització DC.

A grans trets hi ha dues classes d'AFSS controlades elèctricament, les AFSS commutables i les AFSS ajustables. Les commutables commuten la seva resposta a la banda de freqüència desitjada, entre la transmissió i la reflexió, mentre que les ajustables poden canviar la freqüència ressonant en una banda de freqüències determinada. El disseny estructural electromagnètic dels edificis és una aplicació important on la propagació de l'ona electromagnètica es controla per mitjà d'una AFSS absorbent commutable.

A la Fig. 2.15 es mostren algunes AFSS presentades en diverses investigacions.

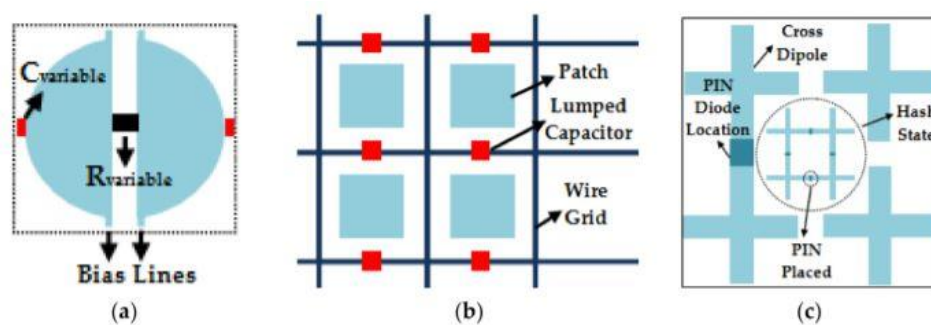


Figura 2.15: Exemples d'AFSS presentades en diverses investigacions [16].

Wearable FSS

De forma recent han estat proposades les FSS modulades com a transponedors per a aplicacions RFID. Investigacions anteriors mostren la possibilitat que aquests dispositius transceptors s'utilitzin en tasques de localització en radars UWB (*Ultrawideband*) o en radars d'ona continua modulada de freqüència. A [19] es presenta una tecnologia RFID semipassiva de baixa potència amb FSS modulades que es poden unir al cos per a aplicacions que es puguin basar en una comunicació de dispersió enrere en la banda ISM de 2,45 GHz. Això també inclou un sensor de temperatura que funciona com a proposta inicial en la modulació d'aquest camp de dispersió enrere de la FSS. Mostra un abast de lectura superior a 3 metres per a situacions properes.

Es preveu que la diversitat sigui una propietat distintiva per als transponedors basats en FSS, ja que es poden modular nombrosos dispositius FSS a la vegada, alhora que es comparteix el senyal modulat d'un sensor a baixa freqüència amb l'ús de cables integrables. La conseqüència de l'amplada de banda més gran de les FSS ofereix certa robustesa davant el desconeixement originat per la variació de les característiques elèctriques del cos. Per a elements tèxtils diminuts sense ajustament addicional (canvi de longitud del dipol), la FSS pot estar directament en contacte amb el cos o hi pot haver un cert espai entremig. A més, el dispositiu es pot situar en diferents parts del cos o mitjançant diferents superfícies segons les exigències de l'aplicació.

En aquest sentit, a [20] es proposa una FSS *wearable* que, com es veurà més endavant, és la base de les simulacions realitzades en aquest estudi.

Meta-Skin FSS

En els darrers temps s'ha incorporat el metall líquid com a component actiu per fer dispositius electrònics extensibles i flexibles. Quan el metall líquid s'injecta en un patró, se li pot donar la forma de dispositius estirables com interconnectats elèctrics, sondes, antenes, sensors de pell artificial i altres dispositius.

S'utilitzen tecnologies convencionals per reduir el fenomen de retrocés (potència reflectida a un radar de sonatge), però recentment s'ha introduït una tecnologia *meta-skin* diferent per omplir l'espai entre un únic meta-àtom estirable a metamaterials a gran escala. S'està investigant la possibilitat d'afinar la ressonància dels metamaterials planars i l'efecte *cloaking*. A [21] es presenta amb detall un *meta-skin* amb propietats de flexibilitat i extensibilitat en règim de microones juntament amb la seva selectivitat de freqüència i efectes de *cloaking*. Se'n mostren imatges a la Fig. 2.16.

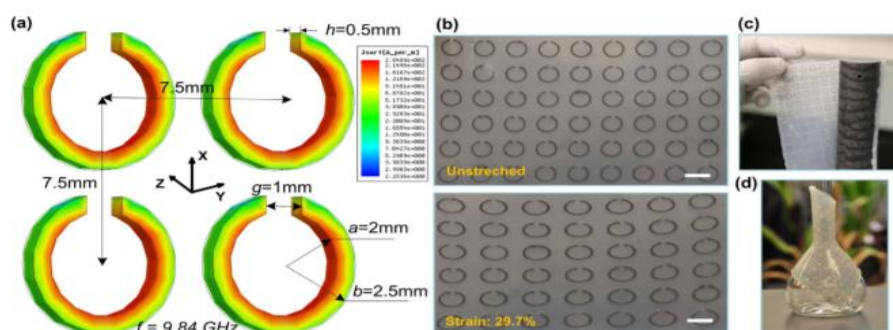


Figura 2.16: (a) Geometria i distribució de corrent superficial simulat de la meta-skin. (b) Fotos de la meta-skin estirada i sense estirar. (c) Foto d'una vareta de niló embolicada per la meta-skin. (d) Demostració de flexibilitat [21].

FSS Òptiques Basades en Matrius de Nano-Partícules (NPAs)

És cert que les FSS són conegudes majoritàriament per aplicacions de filtratge espacial en el domini de microones, però recentment la tecnologia de les FSS ha atret un gran interès per freqüències encara més altes. A [22] es presenten filtres FSS amb una bona resposta per a infrarojos, i a [23] s'hi afegeix una topologia d'una sola capa que mostra fortes bandes de parada. A [24], per la seva banda, es presenta una FSS de quasi infraroig realitzada amb pedaços metàl·lics d'elements circulars. Cal tenir en compte que les inclusions periòdiques metàl·liques, com els pedaços o les ranures, són elements clau en les FSS.

A [25] es proposa un filtre òptic basat en enreixats de longitud d'ona en una matriu de protuberàncies que s'estenen al llarg del substrat. De manera més recent, les matrius de nano-partícules també s'han fet servir com a filtres espacials angulars i com a metasuperfícies en el rang de freqüències òptiques.

FSS tèxtils

Actualment no es troba gaire informació concloent o útil en la literatura sobre FSS tèxtil, però hi ha una altra classe emergent de FSS després de les FSS *wearable*. S'han presentat FSS impreses sobre superfícies llises i flexibles com el paper o el polietilè, utilitzant serigrafia, processos de litografia, impressió d'injecció de tinta i estampació. Una aplicació única és integrar aquestes FSS a la roba per tal de proporcionar comunicacions sobre el cos i fora del cos. Aquestes estructures tèxtils ofereixen avantatges de flexibilitat, lleugeresa, suavitat i una major relació força-pes.

S'han utilitzat tècniques de producció per produir components conductors, i d'una manera semblant les superfícies tèxtils es poden utilitzar per construir teixits capaços de controlar la propagació d'ones electromagnètiques en freqüències de microones per incrustar en edificis. Aquestes FSS basades en teles solen tenir un ús a curt termini i són fàcilment controlables. La Fig. 2.17 mostra alguns exemples de FSS tèxtils.

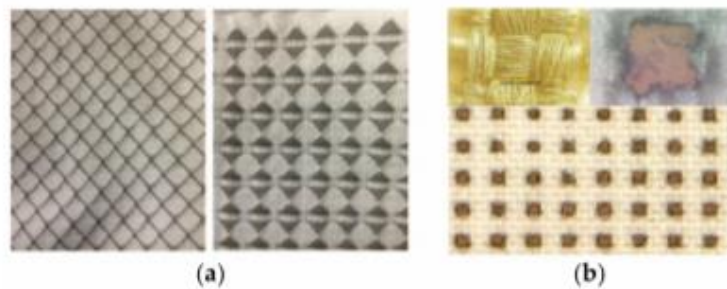


Figura 2.17: Exemples de FSS tèxtils [16].

2.1.3.8 Aplicacions actuals i futures de les FSS

En la classificació de les FSS s'ha pogut veure algunes de les seves aplicacions actuals i d'altres que estan en desenvolupament. És un fet que actualment les FSS tenen multitud d'aplicacions tant comercials com militars. Un bon exemple d'aplicació comercial és la porta de la pantalla d'un forn de microones d'una cuina típica, la qual és una pantalla que consisteix en una matriu periòdica de forats metàl·lics dissenyada per reflectir energies de microones al voltant de 2,45 GHz. Una altra aplicació interessant que encara no s'ha comentat és la cambra anecoica. Aquestes cambres es folren amb materials dissenyats per absorbir ones electromagnètiques, amb l'objectiu d'aïllar la cambra de qualsevol influència externa i simular en el seu interior unes condicions d'espai lliure. Són especialment útils en àmbits de telecomunicacions.

A banda d'això, i com ja s'ha comentat anteriorment, les FSS s'utilitzen molt en radars i antenes. Un exemple seria cobrir una antena amb una superfície selectiva de freqüència per tal de protegir-la sense alterar les seves propietats. També s'utilitzen per al filtratge de banda en radiòmetres.

Per últim, és conegut que les FSS s'utilitzen en entorns militars. Un dels principals objectius és intentar fer-se invisible als radars d'embarcacions o vehicles enemics, però a vegades també es busca abordar la problemàtica de la coincidència de multitud de senyals i sensors pròxims que pugui desembocar en una degradació del rendiment de les antenes de les embarcacions.

Fins ara s'han vist sobretot aplicacions actuals de les FSS, però el cert és que aquestes superfícies tenen un potencial molt més gran, i constantment s'estan estudiant i desenvolupant possibles futures aplicacions per a les quals sembla que les característiques de les FSS podrien ser de gran utilitat. A més, es busca resoldre problemes teòrics i pràctics que fins ara encara no tenen una solució clara. A [16] es fa la següent llista de futures qüestions a resoldre o millorar:

- **Disseny pragmàtic de FSS.** Per tal d'aconseguir una amplada de banda constant amb la variació de l'angle d'incidència, són necessaris a les capes exteriors (per a elements planars) substrats amb baixes constants dielèctriques i gruix per sota de la longitud d'ona. Tanmateix, actualment encara no hi ha materials amb constants dielèctriques tan baixes, i encara que hi fossin podria ser que tinguessin problemes d'adaptació per raons mecàniques. Es busca dissenyar materials amb aquestes característiques o buscar una altra solució apropiada a aquesta qüestió.
- **Eines de disseny.** Comparat amb unes dècades enrere, avui en dia són molt comunes les tècniques d'anàlisi d'ona completa per tota classe de geometries FSS. No obstant això, és difícil mantenir un registre d'aquests mètodes. Hi ha molts programes comercials disponibles que proporcionen una anàlisi precisa amb més fiabilitat. Tanmateix, es poden analitzar millor les superfícies periòdiques amb aquests paquets analítics, ja que l'estructura està representada per una cel·la unitària global amb dimensions per sota de la longitud d'ona. Això, però, limita l'anàlisi per a altres tipus de geometries FSS complexes o desiguals com per exemple superfícies corbes o estructures sense periodicitat. Es continua treballant en aquest sentit per a assolir noves eines de disseny.
- **Dilema d'optimització.** Fins al moment s'han presentat una gran quantitat d'enfocaments destinats a l'optimització. Aquests enfocaments, però s'han d'utilitzar en el moment i lloc adequats. Se solen analitzar els resultats examinant cada un dels components d'una FSS, però en certs dissenys es fa difícil fer una optimització mitjançant càlculs, ja que per a diferents angles d'incidència i polaritzacions es faria necessari veure centenars o milers de casos de prova. En aquest sentit, caldria tenir un ordinador i un programa ràpids. Tot i això, per a dissenyadors inexperts aquest pot ser el principal

problema, sobretot en escenaris reals. Per exemple, quan la freqüència ressonant i l'amplada de banda canvia en alguns dissenys de FSS, pot ser que no s'obtinguin resultats exitosos fins i tot per variacions moderades dels angles d'incidència i polaritzacions, ja que és possible que el programa informàtic continuï simulant en un bucle sense una solució bona. Cal tenir en compte que és possible que molts dissenyadors no siguin conscients de comprovar el perfil dielèctric i es concentrin en canviar altres paràmetres geomètrics. Això pot fer que no es noti cap efecte sobre factors com els *grating lobes* o la inestabilitat de la freqüència de ressonància. El repte és intentar sortejar aquest caos i aprendre a definir adequadament els paràmetres a modificar durant un procés d'optimització.

- **Anàlisi acurada.** De manera general, una bona anàlisi d'una FSS lògicament produeix una resposta precisa i fiable. Sorprenentment, però, a vegades no funciona en alguns dissenys. Això és perquè se suposa que la distribució de corrent en els elements de la matriu es manté constant i només varien l'amplitud i/o la fase amb l'angle d'incidència. En alguns casos, alguns modes poden alterar la distribució de corrent per a un angle d'incidència oblic, provocant que l'amplada de la banda ja no sigui constant i per tant fallant en l'anàlisi. Una solució per a aquest problema podria ser utilitzar elements de matriu compactes de manera que només es trobi a la zona de ressonància la distribució de corrent primari. De totes maneres, hi ha una limitació per reduir la mida dels elements i l'espai entre elements. A més, això pot afectar les condicions planes de la part superior de la corba de transmissió. Per tant, cal aconseguir una compensació entre l'amplada de banda constant i la part superior plana de la resposta de freqüència.
- **Disseny miniaturitzat.** L'exigència de flexibilitat en certes aplicacions com radars d'antenes fa que les FSS miniaturitzades es requereixin en molts casos. A més, és possible que els elements i espais entre elements de grans dimensions no siguin adequats per a la realització de superfícies corbes. Llavors, pot ser molt important una mida reduïda de la cel·la unitària, amb dimensions elèctriques força petites i gran estabilitat angular de la FSS. Per tant, el concepte d'element de matriu miniaturitzat ha evolucionat àmpliament, ja que permet separar les bandes operatives dels *grating lobes*. Cal seguir treballant per resoldre aquest repte, sobretot per a aplicacions rígides i amb poc espai.

- **Amplada de banda operativa més gran.** Clarament un dels reptes clau en el disseny i la teoria de les FSS és la limitació de l'amplada de banda operativa, sobretot per a les estructures FSS d'una sola capa. Aquest és el repte dels dissenyadors, malgrat que ja s'ha vist que les estructures multicapa contribueixen a assolir amplades de banda més grans.
- **Reptes de fabricació en estructures 3D.** Com ja s'ha comentat, les FSS convencionals estan formades de matrius d'elements bidimensionals. Aquestes FSS experimenten una selectivitat de freqüència limitada, desplegaments lents i una certa inestabilitat sota diferents angles incidents. Recentment, però, estan apareixent les innovadores FSS 3D, que milloren les limitacions mencionades anteriorment. Encara que s'ha demostrat que aquestes FSS 3D mostren una bona resposta quant a rangs de freqüència, el veritable repte és la complexitat de realització i fabricació que tenen.
- **Transmissió mitjançant vidre d'estalvi d'energia.** Les FSS amb funcions passa-banda estan dissenyades per permetre la transmissió de senyals de comunicacions sense fils mitjançant finestres de vidres d'estalvi d'energia en edificis moderns amb els requisits principals d'una resposta de freqüència estable i una amplada de banda raonablement gran. Les obertures de la FSS, però, han de ser com més estretes millor per tal d'intentar oferir el màxim aïllament tèrmic. Per no degradar aquest aïllament tèrmic cal tenir cura en fer el revestiment de la FSS, i també per mantenir les característiques estètiques del vidre de la finestra. El repte és la possibilitat d'obtenir una FSS ressonant forta i una resposta de transmissió perfecta.
- **Problemes relacionats amb les FSS actives.** Les FSS actives resolen certs problemes en el rendiment de les FSS convencionals, i també controlen potencialment la resposta electromagnètica a través d'una sintonització dinàmica mitjançant excitacions externes. Tot i això, hi ha diversos problemes associats a les FSS actives que requereixen l'atenció dels dissenyadors. A vegades s'observa una degradació del rendiment de la FSS que es produeix per interferències del senyal amb una xarxa de polarització de grans dimensions. A això s'afegeix que aquestes estructures són de difícil fabricació i tenen un cost elevat. A més, un dels principals problemes és el seu elevat consum d'energia a causa de l'elevat nombre de dispositius actius. Una possible solució per reduir considerablement el nombre d'elements actius és utilitzar una superfície d'alta impedància activa (HIS), amb l'inconvenient que és la formació d'una estructura complexa.

- **FSS per a aplicacions de ciutats intel·ligents.** Avui en dia, la comunicació mòbil sense fils es desenvolupa de manera principal en bandes de freqüència de 6 GHz o inferiors. Es produeix un problema significatiu, però, a la banda Wifi amb un entorn de treball dens. A més, les aplicacions de ciutats intel·ligents requereixen accés a freqüències d'ona mil·limètrica superiors a 24 GHz. La mala propagació de les ones a través dels objectes i materials de l'estructura esdevé un dels reptes pràctics en una banda de freqüència tan alta. Les FSS col·locades en els edificis i dins dels mateixos es dissenyen específicament per millorar la recepció i transmissió de senyals de radiofreqüència. De totes maneres, aquestes aplicacions demanen una gestió dels problemes de propagació i interferències en aquestes bandes de freqüència altes i baixes.
- **Problema de pèrdues de transmissió.** El disseny de les estructures FSS està pensat per mostrar una resposta de transmissió sense pèrdues. No obstant això, mostren grans pèrdues de transmissió en escenaris reals. Es vol seguir treballant en aquest aspecte per tal de millorar la resposta el màxim possible.

2.2 CST: Primer disseny (exemple)

Per tal de realitzar els dissenys i les simulacions, el software utilitzat és CST (Computer Simulation Technology).

Aquest primer disseny està basat en la proposta que es fa a [20] i serà la base a partir de la qual es treballarà en els següents dissenys. Es proporciona una geometria i característiques del disseny que s'implementaran en aquest primer cas, i posteriorment s'aniran modificant per als següents casos. Com s'ha comentat anteriorment, se simularà una FSS *wearable* formada per una base i uns anells ressonants fets d'un teixit conductor metal·litzat, i entremig un substrat tèxtil no conductor de feltre. L'objectiu de tots els dissenys és aconseguir el màxim nivell d'absorció de radiació electromagnètica per a la freqüència de treball. A continuació es comentarà el procediment que cal seguir per fer el disseny i posteriorment simular-lo. Si bé es veuran dissenys diferents, aquests passos serveixen de manera general tant per a aquest primer cas com per als casos posteriors.

2.2.1 Plantilla del projecte

En entrar a CST, el primer que cal fer és configurar la plantilla sobre la qual es treballarà i que tindrà les condicions idònies per desenvolupar l'objectiu. Se selecciona l'opció **New Template**. A continuació es demana seleccionar una àrea d'aplicació i dins d'aquesta àrea, un flux de treball. L'àrea seleccionada serà **MICROWAVES & RF/OPTICAL** i posteriorment se selecciona **Periodic Structures**. Tot seguit, com a flux de treball, l'opció seleccionada serà la que s'ajusta més al disseny que es vol fer, **FSS, Metamaterial - Unit Cell**. A continuació se selecciona **Phase Reflection Diagram**. El següent pas és seleccionar el *solver* que es farà servir en les simulacions. Ja que l'estudi que s'està realitzant gira al voltant del valor de la freqüència, l'elecció serà el **Frequency Domain solver**. La Fig. 2.18 mostra aquest procés.

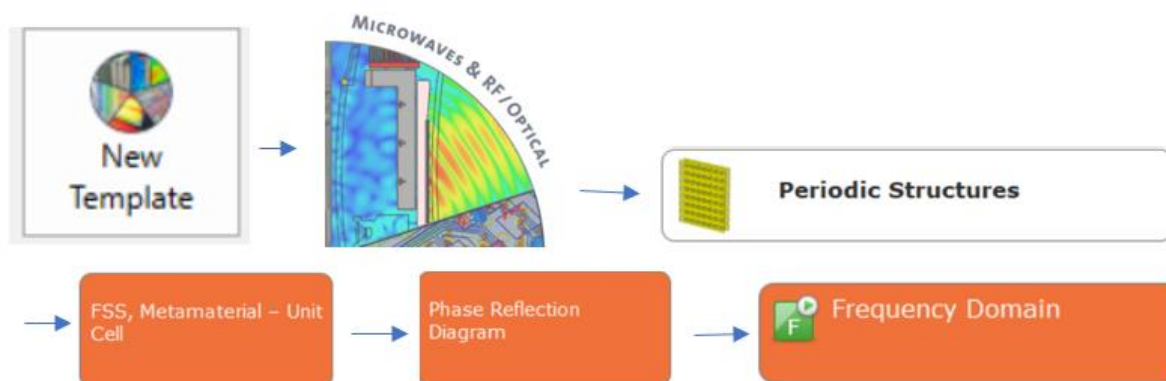


Figura 2.18: Opcions escollides a la plantilla del projecte.

Posteriorment, cal seleccionar les unitats amb les quals es treballarà. Les unitats seleccionades són les que es mostren a la Fig. 2.19.

Please select the units:

Dimensions:	mm
Wavelength / Freq.:	mm / GHz
Time:	s
Temperature:	Kelvin
Voltage:	V
Current:	A
Resistance:	Ohm
Conductance:	S
Inductance:	H
Capacitance:	F

Figura 2.19: Unitats utilitzades a CST.

A continuació, se seleccionarà que volem treballar en freqüència i es definirà el rang. En aquest cas serà de 7 a 11 GHz, tot i que si posteriorment es vol modificar el rang de freqüències per fer alguna prova, es pot fer a través d'una opció del software. Si es vol es pot establir un monitoratge dels resultats, i és important marcar l'opció **Calculate reflectance, transmittance and absorbance**, ja que ens proporcionarà gràfics que ens evitaran càlculs laboriosos. La Fig. 2.20 mostra aquestes opcions escollides.

Please select the Settings

Define using	<input checked="" type="radio"/> Frequency <input type="radio"/> Wavelength
Frequency Min.:	7 GHz
Frequency Max.:	11 GHz
Monitors:	<input type="checkbox"/> E-field <input type="checkbox"/> H-field <input type="checkbox"/> Farfield <input type="checkbox"/> Power flow <input type="checkbox"/> Power loss
Define at	<input type="text"/> GHz Use semicolon as a separator to specify multiple values. e.g. 20;30;30.1;30.2;30.3
	<input checked="" type="checkbox"/> Calculate reflectance, transmittance and absorbance

Figura 2.20: Configuració a CST.

Per finalitzar, la Fig. 2.21 mostra com ha de quedar el resum de la configuració de la plantilla del projecte. La simulació es configurarà en condicions periòdiques de *boundaries* i amb una excitació dels ports amb mode Floquet.

Please review your choice and click 'Finish' to create the template:

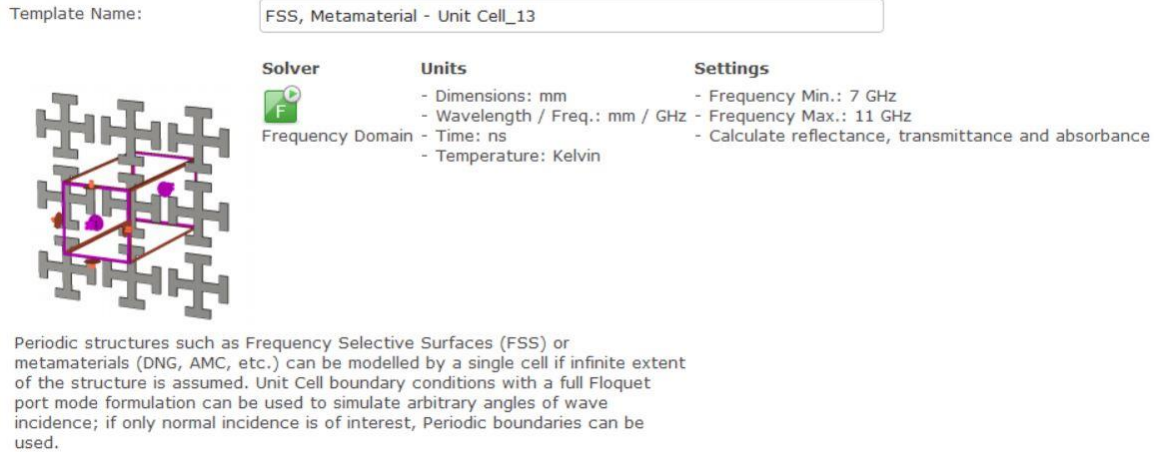


Figura 2.21: Resum de la configuració de la plantilla del projecte.

2.2.2 Geometria del disseny

Un cop feta la configuració i amb el programa inicialitzat, el següent pas és la creació de la cel·la unitària. Com s'ha comentat anteriorment, el disseny està basat en el que es proposa a [20], on s'estableix la geometria següent, mostrada a la Fig. 2.22:

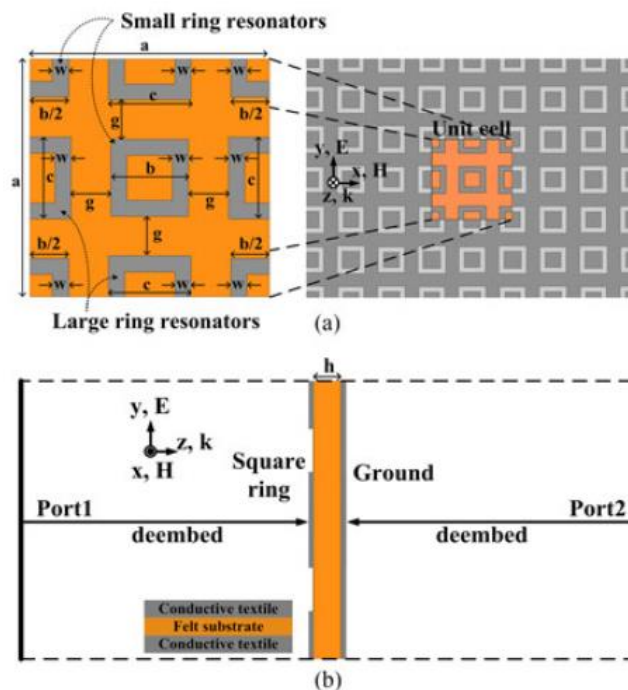
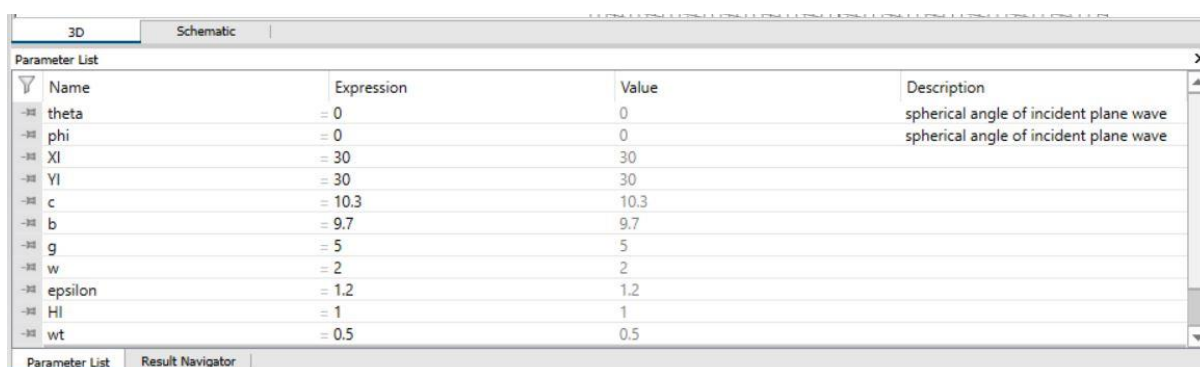


Figura 2.22: Geometria del disseny d'exemple [20].

Dins de CST, i per a la màxima comoditat i optimització de treball, es definiran els paràmetres geomètrics de la cel·la. Les dimensions també són definides a [20], i són les que mostra la Taula 2.2. La Fig. 2.23 mostra els paràmetres definits a CST.

a	30 mm
b	9.7 mm
c	10.3 mm
w	2 mm
g	5 mm
h	1 mm

Taula 2.2: Dimensions geomètriques de la cel·la unitària. Disseny d'exemple.



The screenshot shows the 'Parameter List' window in CST software. It contains a table with the following data:

Name	Expression	Value	Description
theta	= 0	0	spherical angle of incident plane wave
phi	= 0	0	spherical angle of incident plane wave
XI	= 30	30	
YI	= 30	30	
c	= 10.3	10.3	
b	= 9.7	9.7	
g	= 5	5	
w	= 2	2	
epsilon	= 1.2	1.2	
Hl	= 1	1	
wt	= 0.5	0.5	

Figura 2.23: Paràmetres definits a CST.

Amb els paràmetres ja definits, es pot procedir a crear la geometria. Els diversos components de la geometria es crearan mitjançant la instrucció **Brick**, que podem trobar a la secció **Shapes** de l'opció **Modelling** de la barra superior de CST. D'aquesta manera es defineixen les dimensions del component en qüestió, així com el material del qual està fet. Per al cas concret dels anells metàl·lics ressonants, per crear el forat dins del quadrat es farà servir l'operació booleana **Subtract** dins de la secció **Tools**, tal com mostra la Fig. 2.24.

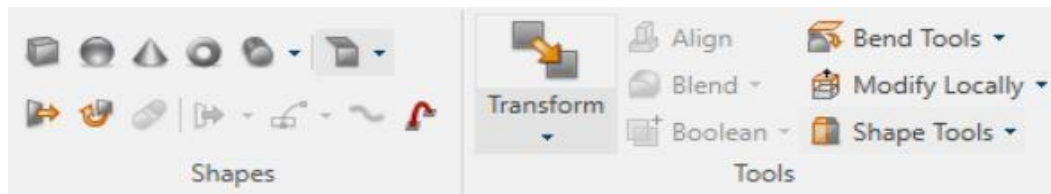


Figura 2.24: Seccions shapes i tools de CST.

Respecte als materials utilitzats, per a la base i els anells metàl·lics s'utilitzarà **PEC** (Perfect Electric Conductor), disponible a CST. Per al substrat es definirà el material **Felt**, amb les característiques que es mostren a la Fig. 2.25.

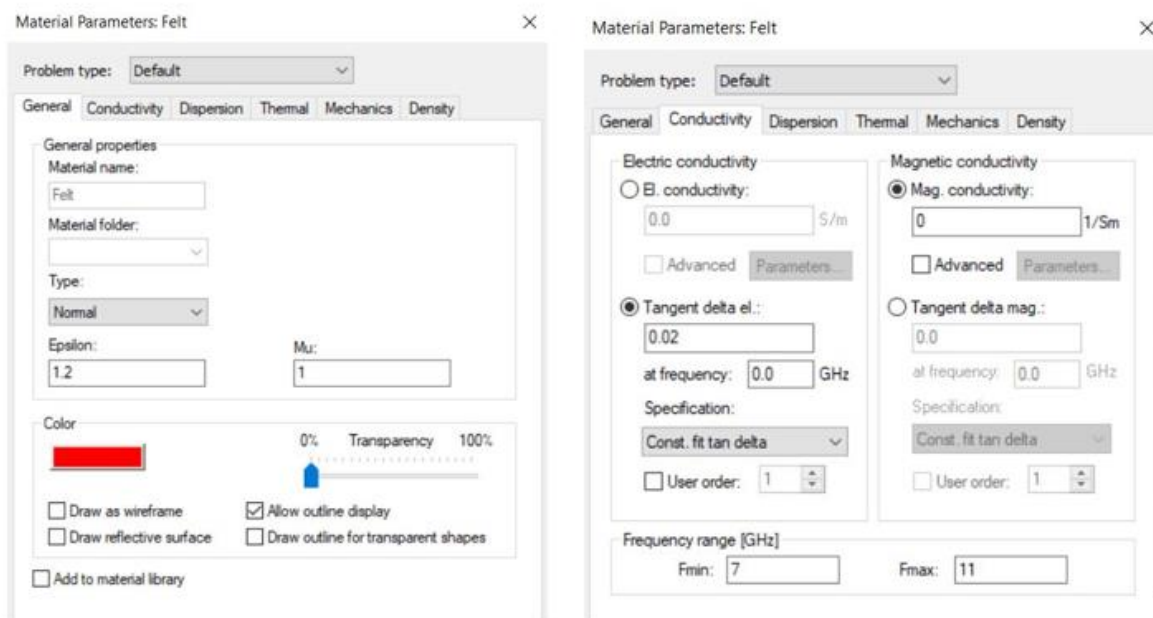


Figura 2.25: Característiques del material Felt.

Un cop creada, la geometria té l'aspecte que es mostra a la Fig. 2.26.

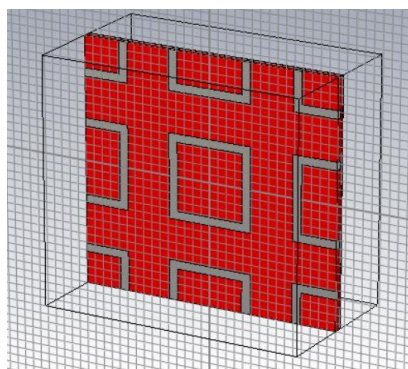


Figura 2.26: Geometria del disseny d'exemple creada a CST.

2.2.3 Ports i resta de l'estructura

El següent pas és crear els ports i la resta de l'estructura. En aquest cas els ports ja hi són presents, i són **Zmax** i **Zmin**, tal com es veu a la Fig. 2.27.

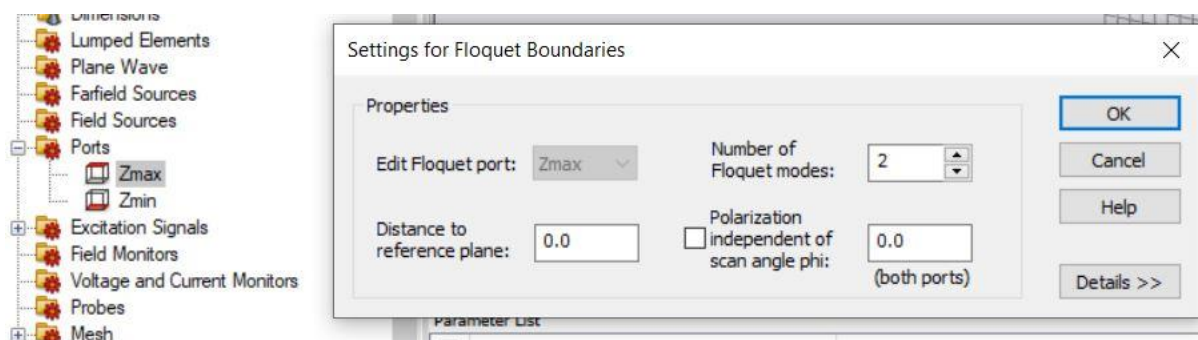


Figura 2.27: Ports del disseny.

Tot seguit, cal definir l'ona incident. Per fer-ho se selecciona l'opció **Boundaries** que es troba dins la secció **Settings**, que a la vegada es troba dins de **Simulation**. Aquí es pot especificar, per exemple, l'angle d'incidència, així com assignar diferents periodicitats en X i en Y. Pel que fa a *boundaries* pròpiament, en les direccions X i Y se seleccionarà l'opció **unit cell**, mentre que en Z se seleccionarà **open (add space)** per assegurar la distància amb l'estructura. La Fig. 2.28 mostra aquestes opcions escollides.

Per tant, tenim una ona plana incident que es desplaça al llarg de l'eix Z i ho fa des de Zmax a Zmin.

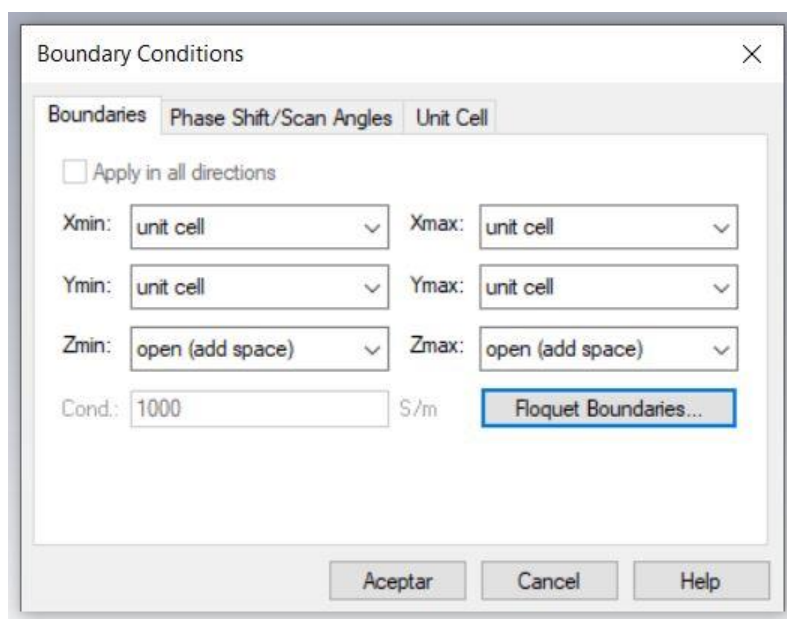


Figura 2.28: Configuració de les boundaries.

2.2.4 Configuració del solver

Finalment, ja es pot posar en marxa el **sol**ver per començar la simulació. Dins de **Simulation**, se selecciona **Setup Solver** per configurar-lo. Es configurarà d'una manera o d'una altra en funció de quins resultats es volen exactament i com es volen. En aquest cas, com a font es seleccionarà Zmax, ja que com s'ha comentat amb anterioritat l'ona viatjarà de Zmax a Zmin.

Per al tipus de malla s'escolirà **Tetrahedral**. La resta de característiques escollides per a aquest cas es mostren a la Fig. 2.30, així com l'aspecte general de la configuració del **sol**ver a la Fig. 2.29.

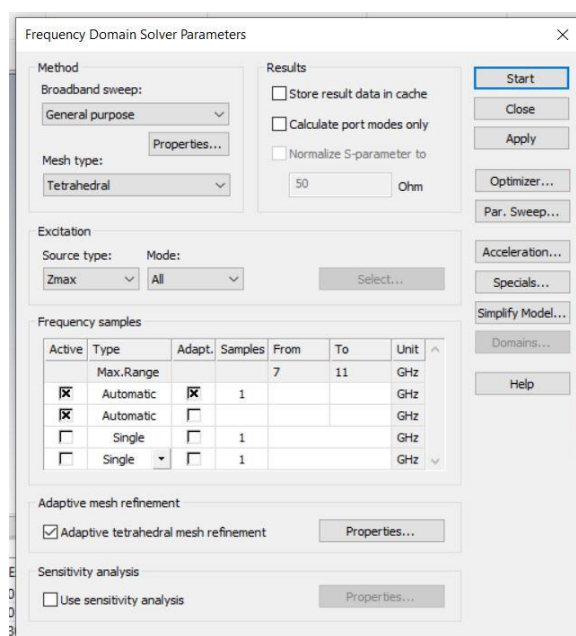


Figura 2.29: Aspecte general de la configuració del solver.

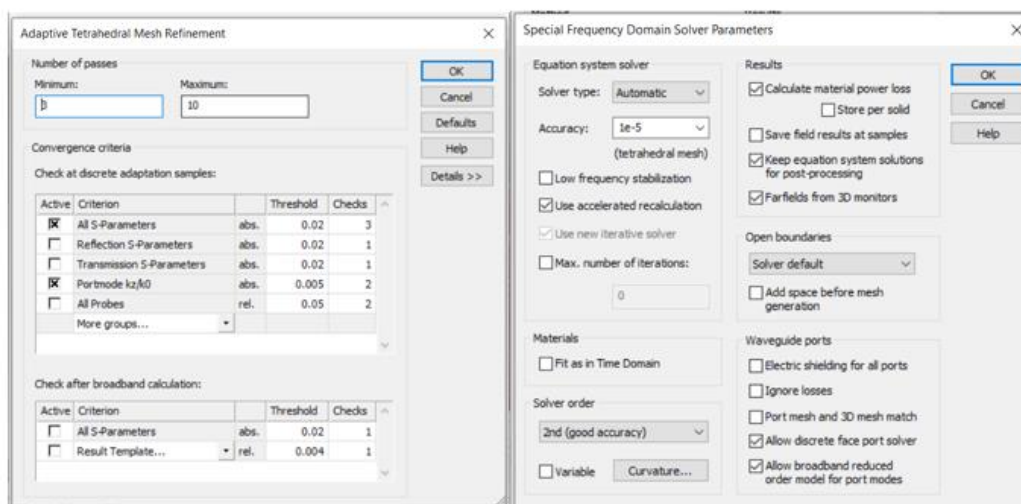


Figura 2.30: Característiques del solver.

2.2.5 Resultats de la simulació

Si bé en els propers dissenys l'estudi està enfocat en la resposta d'absortivitat, és de gran interès observar els paràmetres de dispersió o paràmetres S, que van estretament lligats al factor d'absorció i representen la reflexió des de la FSS i la transmissió a través de la mateixa. A la Fig. 2.31 s'observa el resultat de la simulació pel que fa als paràmetres S.

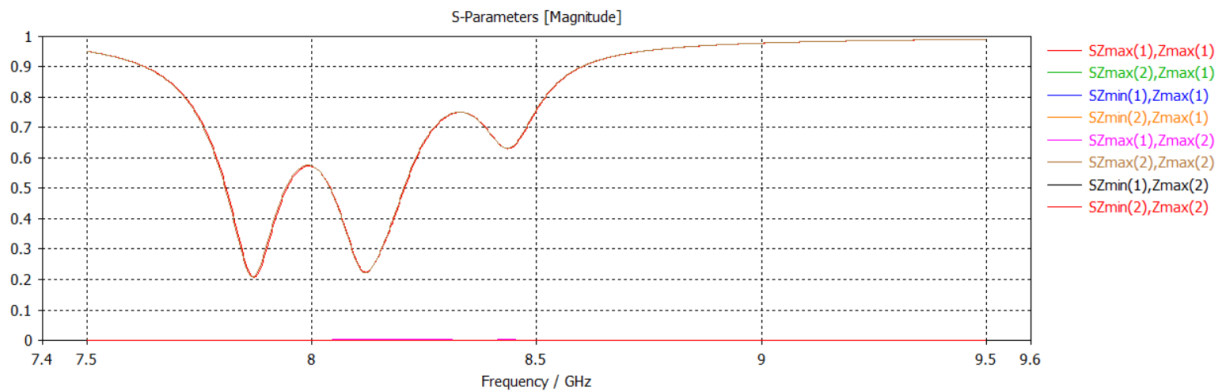


Figura 2.31: Simulació dels paràmetres S. Disseny d'exemple.

El primer que cal observar és que es produeixen dos pics baixos prop de 7.9 GHz i 8.1 GHz. En aquests punts és on la reflexió està més a prop de ser completa, així com la transmissió de ser totalment bloquejada. Concretament el pic de 7.9 GHz és el punt on la reflexió és més a prop de ser completa, i correspon a un valor aproximadament de -13.65 dB. També és interessant observar que gràcies a la simetria de la cel·la unitària les reflexions i transmissions dels dos modes són pràcticament idèntiques, i la petita discrepància que tenen és causada per la malla tetraèdrica.

El resultat de la simulació que ens mostrarà de manera concloent si la FSS es comporta de la manera desitjada, és el factor d'absorció o absorptivitat. Com s'ha vist anteriorment, aquest valor es calcula mitjançant l'expressió (2.7), que es recorda a continuació.

$$A = 1 - |\Gamma|^2 - |T|^2 = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$$

En l'expressió, Γ i T són els coeficients de reflexió i transmissió respectivament, que es poden extreure dels paràmetres S. El mateix CST realitza aquest càlcul i mostra el resultat, que es pot trobar, tal com indica la Fig. 2.32, a la secció **Tables** del **Navigation Tree**.

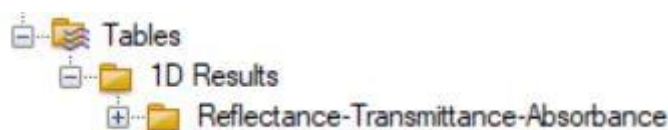


Figura 2.32: Secció Tables de CST.

En aquest cas s'exporten les dades d'absortivitat i amb un fitxer Excel es crea una gràfica per mostrar aquests resultats en termes de freqüència, com es mostra a la Fig. 2.33.

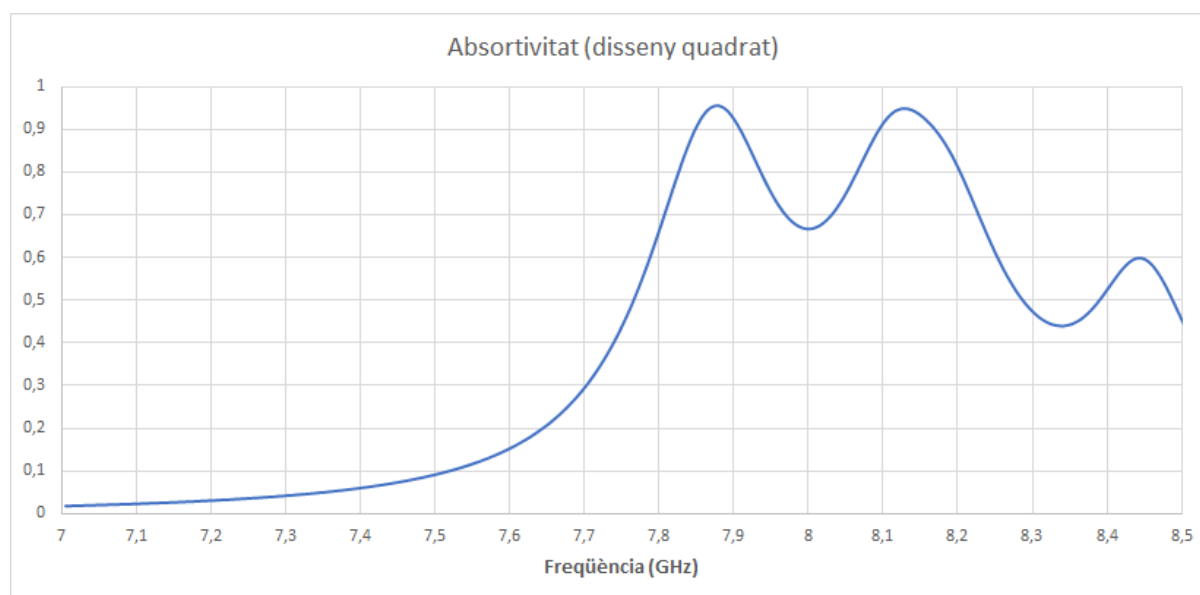


Figura 2.33: Gràfica de l'absortivitat. Disseny d'exemple. Simulació.

En la línia dels resultats que s'han comentat anteriorment en els paràmetres S, es pot veure que els pics d'absorció màxima es produeixen al voltant de 7.9 GHz i 8.1 GHz. Concretament, el pic màxim es produeix a 7.87 GHz i s'assoleix un nivell d'absorció del 95.6 %. Pel que fa al segon pic, es troba a 8.13 GHz i assoleix un 94.9 % d'absorció.

Si aquests resultats es comparen amb els resultats que mostra [20], pot observar-se que no són iguals. En els resultats a [20], els pics d'absorció es troben a 9 GHz i a 9.8 GHz. Si bé en el cas d'aquest estudi els pics d'absorció són igual o més alts, crida l'atenció aquesta diferència en els valors de la freqüència. Això és causat

per una petita diferència en les dimensions geomètriques dels elements quadrats de la matriu. Tot i que la distribució d'aquests elements és la mateixa, en la simulació d'aquest estudi tots els quadrats són geomètricament idèntics, mentre que a [20] es combinen dues dimensions diferents de quadrats. La diferència geomètrica és molt petita, però amb tota seguretat és la causa de la diferència de resultats. A més, cal recordar que a [20] s'utilitza ANSYS HFSS i en aquest estudi s'utilitza CST.

Una vegada aclarits els resultats, la simulació d'aquest primer disseny permet familiaritzar-se amb el funcionament de CST així com aprendre a interpretar els resultats obtinguts, i serà la base a partir de la qual es desenvoluparan els altres dissenys i a partir de la qual s'establiran les condicions prèvies i els punts en comú que han de tenir tots els dissenys abans de fer les simulacions corresponents.

2.3 Consideracions i condicions prèvies

Com ja s'ha comentat anteriorment, aquest estudi està centrat en el rang de radiofreqüència dins de l'espectre electromagnètic, i més concretament en el rang de microones. Aquests intervals de freqüències estan extremadament plens, amb un gran nombre de serveis i aplicacions que en alguns casos fins i tot ocupen les mateixes freqüències. En casos extrems, la interacció de gran nombre de senyals compartint freqüències podria derivar en un error de comunicacions o d'alguna de les aplicacions que funcionen a les freqüències en qüestió. Per això és important mirar d'ordenar les aplicacions i regular els intervals de freqüències per evitar futurs problemes [26].

Dins d'aquest rang, la freqüència escollida en aquest estudi és **7.9 GHz**. En aquesta freqüència i freqüències properes es desenvolupen un gran nombre d'aplicacions, però destaquen sobretot les transmissions per satèl·lit. Hi treballen tant satèl·lits fixos com mòbils, i la transmissió es produeix sobretot des de les estacions terrestres cap al satèl·lit. Per als satèl·lits fixos es poden destacar les transmissions de veu, dades i vídeo entre diversos punts de la superfície terrestre (un exemple clar i quotidià seria la televisió per satèl·lit), mentre que els sistemes de satèl·lits mòbils ajuden a connectar regions remotes, vehicles, vaixells, persones i aeronaus amb altres parts del món o amb altres unitats mòbils o estacionàries de comunicacions, i també serveixen com a sistemes de navegació. A més, a aquesta freqüència també poden treballar aplicacions d'anàlisi meteorològica i sistemes de vigilància regional, com aeroports i altres instal·lacions que requereixin una seguretat considerable. Per tant, una FSS optimitzada treballant a aquesta freqüència pot ser molt útil per la protecció humana contra la radiació, especialment de les persones que es troben en els entorns de treball de les aplicacions que s'acaben d'explicar, així com per a l'aïllament de certs senyals, i a conseqüència d'això evitar interaccions entre senyals que puguin donar lloc a interferències i errors.

Una vegada definida la freqüència en la qual estaran centrats els dissenys, es defineixen un seguit de condicions prèvies que tindran tots ells en comú i que cal tenir en compte abans de fer les simulacions:

- Tots els dissenys proposats pertanyen al grup 2 de tipus d'elements bàsics de la matriu (vegeu la secció 2.1.3.7 d'aquest estudi, referent a la classificació de les FSS). Els elements d'aquest grup solen ser els més utilitzats en aquest tipus d'aplicacions, i per això en aquest estudi s'utilitzen aquests dissenys.
- Les dimensions de la cel·la unitària estan estretament lligades amb la freqüència escollida. S'aplica el principi que per pujar en freqüència cal reduir les dimensions, i per baixar en freqüència cal augmentar-les. Partint d'aquesta base, cada disseny té les seves peculiaritats i funcionen de manera diferent.
- En tots els dissenys es manté constant el gruix del substrat amb valor d'**1 mm**.

- En tots els dissenys els components estan formats pels mateixos materials i d'igual manera es mantenen les propietats de cada material. S'utilitza **PEC** (Perfect Electric Conductor) per a la base així com per als anells metàl·lics, i **Felt** ($\epsilon_r = 1.2$, $\tan \delta = 0.02$) per al substrat.
- Per tal d'assolir la freqüència desitjada, les modificacions que es faran seran sobre les dimensions geomètriques dels elements metàl·lics, així com sobre la mida del quadrat del substrat si és necessari (respectant sempre el gruix).

2.4 CST: Disseny circular

El primer disseny a estudiar és un disseny on els elements de la matriu tenen forma circular. Sabent que els materials utilitzats i les seves propietats són les mateixes que en el disseny quadrat, la Fig. 2.34 mostra un esquema geomètric de la cel·la unitària en aquest cas.

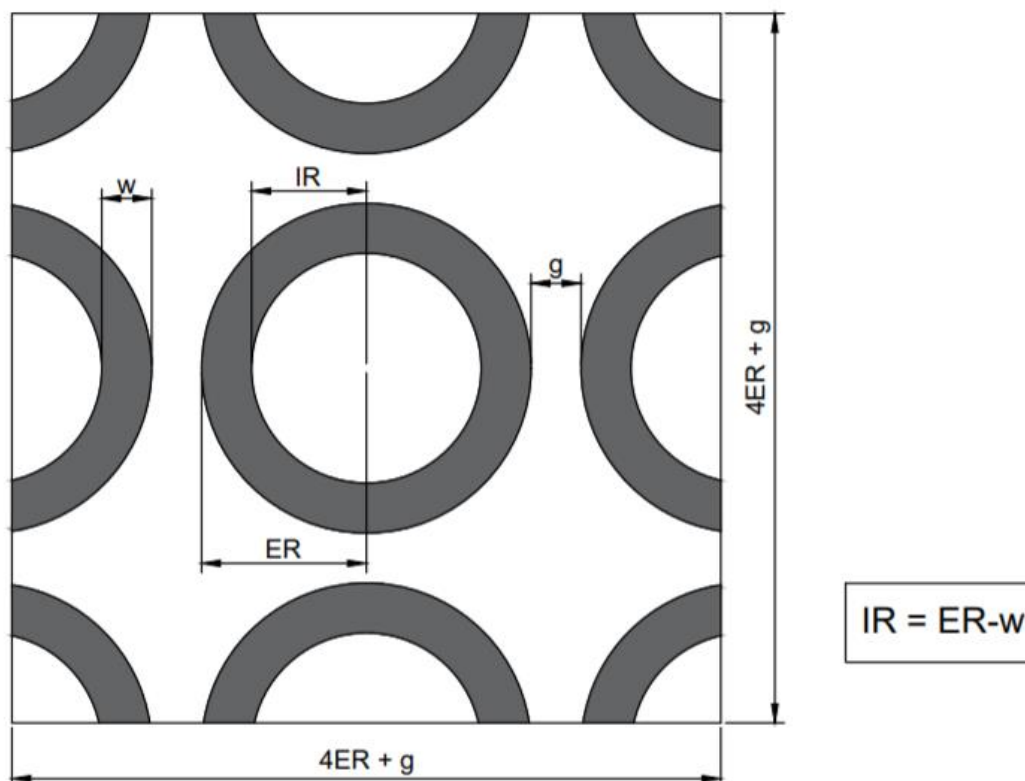


Figura 2.34: Esquema geomètric. Disseny cercle.

En aquest cas, el substrat i la base metàl·lica es crearan de la mateixa manera que en el disseny anterior, però l'element circular es crearà definint un cilindre, del qual s'estableixen els radis interior i exterior.

S'anirà variant amb diverses combinacions dels valors w , ER i g per tal d'assolir unes condicions òptimes a 7.9 GHz, buscant la màxima absortivitat possible en aquest punt. Per fer això s'utilitzarà l'opció **Parameter Sweep** de CST, que permet programar seqüències amb diversos valors dels paràmetres que seran simulades, i d'aquesta manera poder anar centrant les simulacions en el punt òptim. Al principi es pot fer alguna simulació amb valors estimats d'acord amb els requeriments de freqüència per tenir un punt de partida en cas que no es tingui. Posteriorment es comença amb intervals de valors més amplis, i a mesura que es va veient quins són els valors que s'apropen als resultats desitjats es van focalitzant les simulacions en el punt de treball. Una vegada ja s'ha trobat una combinació dels paràmetres per als quals la resposta

d'absorció s'apropa molt al que es desitja, es poden fer unes últimes proves fent petites variacions per intentar aconseguir la màxima optimització.

La Fig. 2.35 i la Fig. 2.36 mostren aquestes seqüències de simulacions, mantenint inicialment $w = 2$:

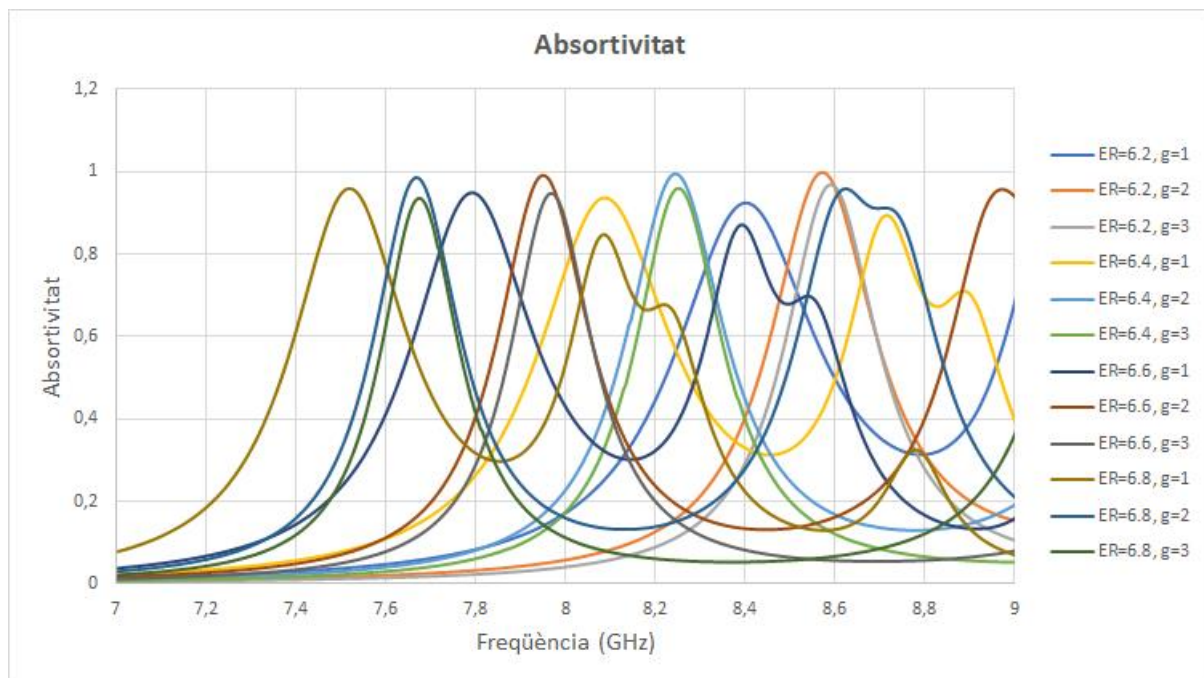


Figura 2.35: Primeres seqüències de simulacions amb $w = 2$. Disseny cercle.

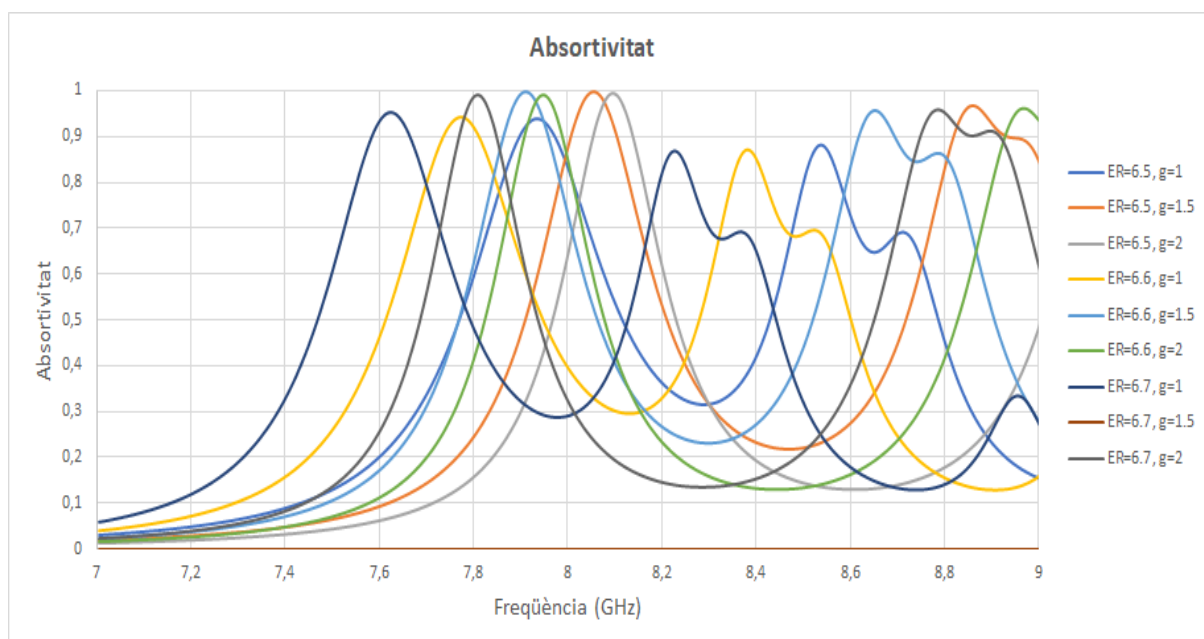


Figura 2.36: Segones seqüències de simulacions amb $w = 2$. Disseny cercle.

A continuació, repetint el procés per a diferents valors del paràmetre w , s'observa que els millors resultats s'obtenen per a valors al voltant de $w = 2$. Es fan unes últimes simulacions fent canvis molt petits en els paràmetres, buscant la màxima optimització. La Fig. 2.37 i la Taula 2.3 mostren el resultat:

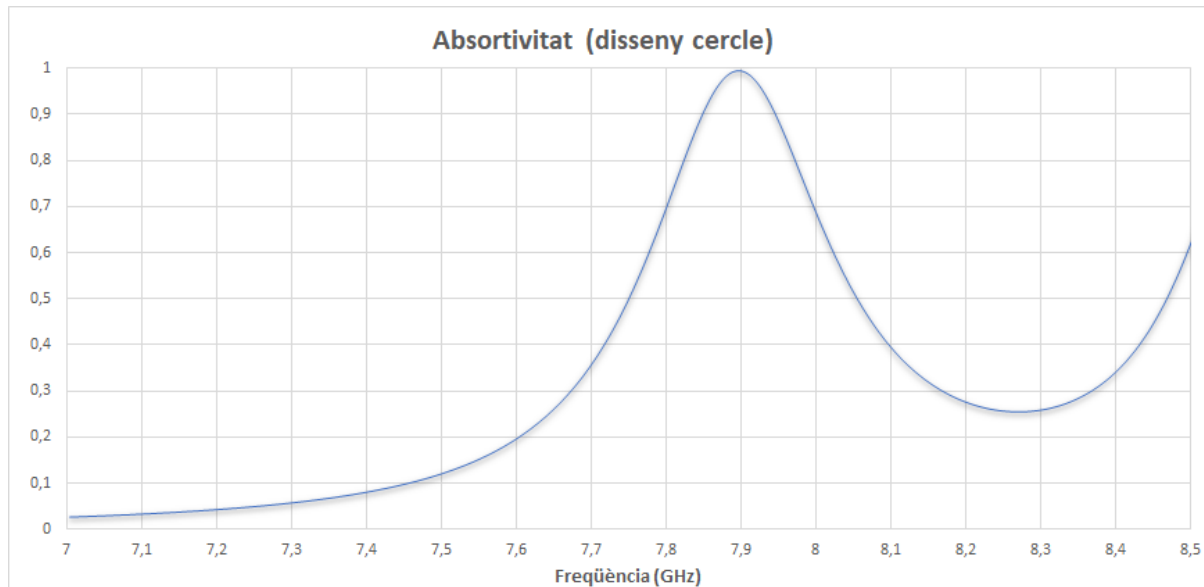


Figura 2.37: Gràfica de l'absortivitat. Disseny cercle. Simulació.

ER	g	w	Amàx	AB (>75%)
6.6 mm	1.4 mm	2 mm	99.3 %	171.5 MHz

Taula 2.3: Dimensions geomètriques finals i resultats obtinguts. Disseny cercle.

Per tant, els millors resultats s'obtenen per als valors dels paràmetres que mostra la taula, assolint un 99.3% d'absorció a 7.9 GHz i amb una amplada de banda de 171.5 MHz per a valors que tenen una absorció superior al 75%.

2.5 CST: Disseny en creu

El següent disseny novament pertany al grup 2 dels tipus d'elements bàsics, i és el que utilitza elements en forma de creu. El seu esquema geomètric és el que mostra la Fig. 2.38. Per tal que els elements quedin simètrics en tot moment i tinguin unes dimensions ben proporcionades, el paràmetre L variarà en funció del paràmetre b , mentre que els paràmetres g i N són independents.

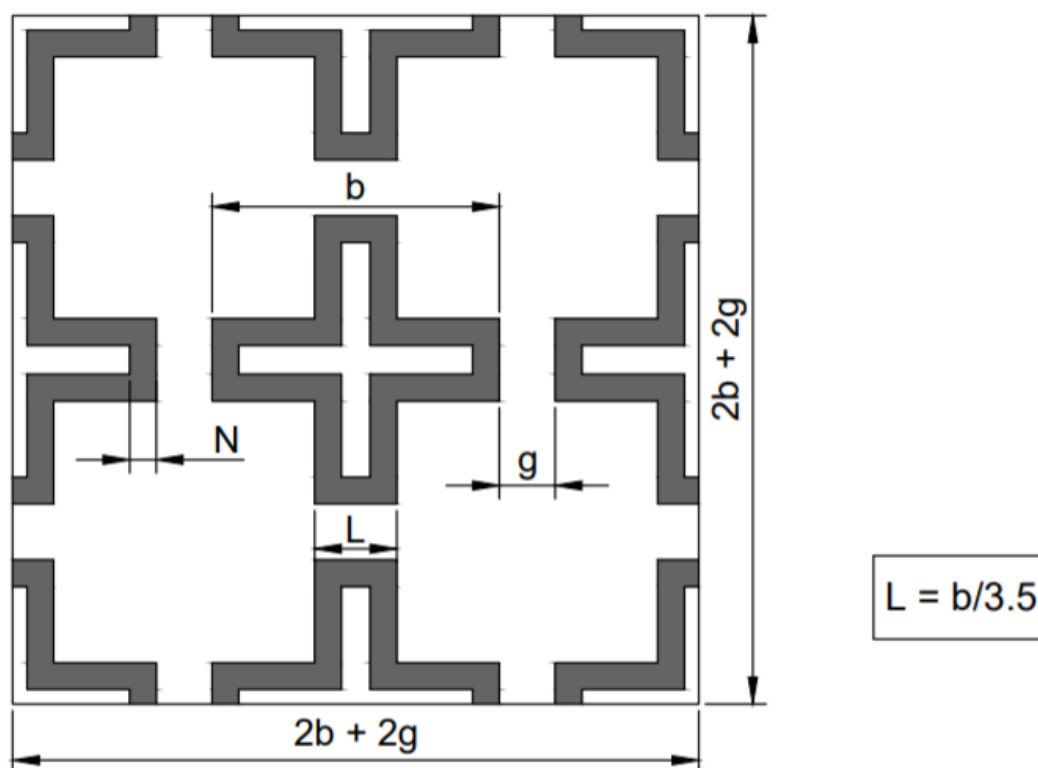


Figura 2.38: Esquema geomètric. Disseny creu.

Per a aquest disseny es crea un element quadrat i, tenint en compte la geometria desitjada, es van sotraient parts de l'element definint les distàncies fins a obtenir la forma de creu. La resta de procés de disseny és el mateix que en dissenys anteriors.

S'utilitzarà igualment l'opció **Parameter Sweep**, i en aquest cas els paràmetres a estudiar per a la màxima absortivitat possible són b , N i g . Se seguirà el mateix procés que en el disseny circular, és a dir, en primer lloc es farà alguna simulació prèvia amb valors estimats d'acord amb els requeriments de freqüència per tenir un punt de partida, i posteriorment se simularan diverses seqüències canviant els valors dels paràmetres i s'aniran focalitzant en la freqüència de treball. Posteriorment, quan ja s'ha trobat una bona combinació de paràmetres, es fan les últimes simulacions per arribar a la màxima optimització.

La Fig. 2.39 i la Fig. 2.40 mostren les seqüències de simulacions, mantenint inicialment $N = 1$:

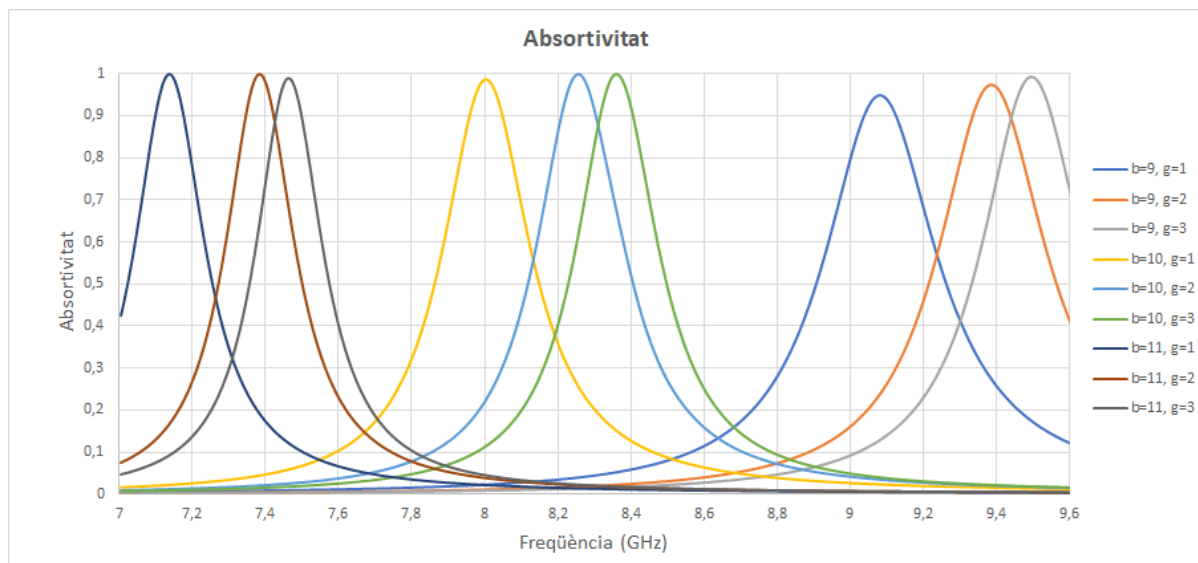


Figura 2.39: Primeres seqüències de simulacions amb $N = 1$. Disseny creu.

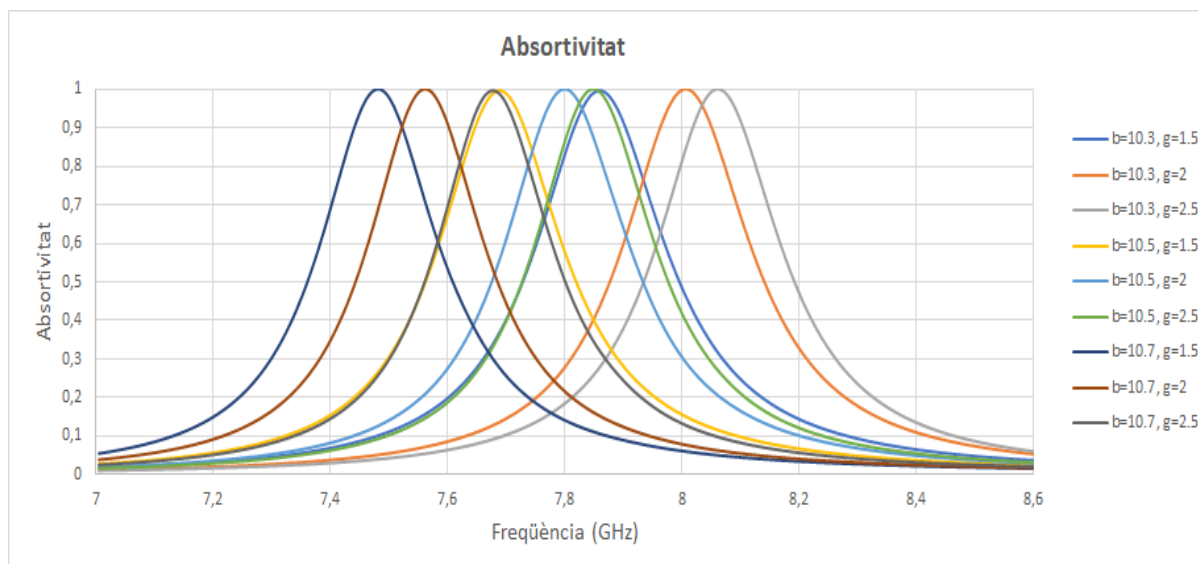


Figura 2.40: Segones seqüències de simulacions amb $N = 1$. Disseny creu.

A continuació, repetint el procés per a diferents valors del paràmetre N , s'observa que els millors resultats s'obtenen per a valors al voltant de $N = 1.4$. Es fan unes últimes simulacions fent canvis molt petits en els paràmetres, buscant la màxima optimització. La Fig. 2.41 i la Taula 2.4 mostren el resultat.

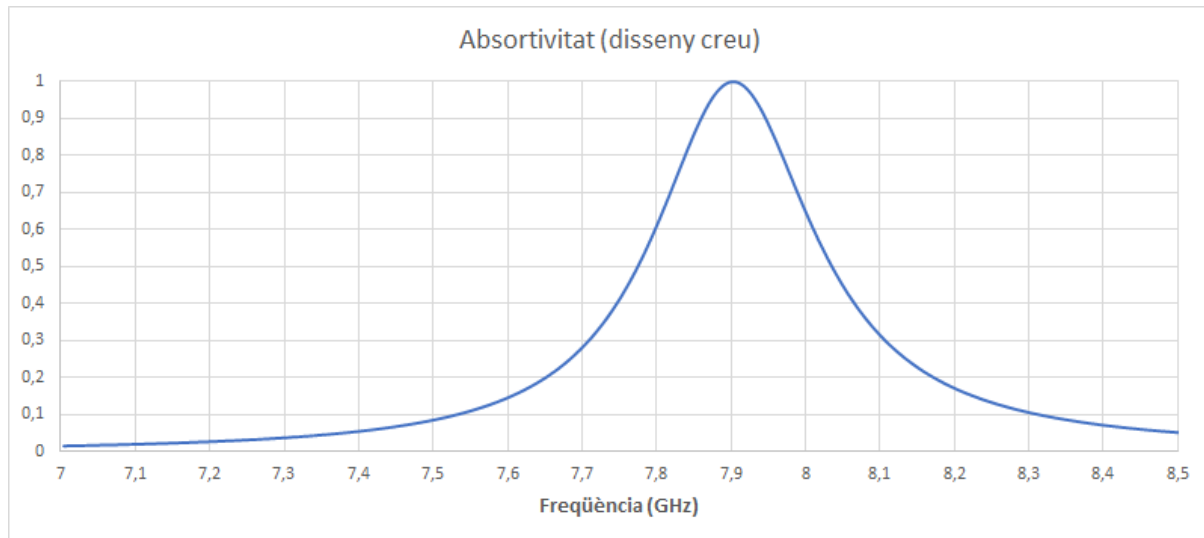


Figura 2.41: Gràfica de l'absortivitat. Disseny creu. Simulació.

b	g	N	Amàx	AB (>75%)
10.8 mm	2.1 mm	1.4 mm	99.9 %	150.7 MHz

Taula 2.4: Dimensions geomètriques finals i resultats obtinguts. Disseny creu.

Per tant, els millors resultats s'obtenen per als valors dels paràmetres que mostra la taula, assolint un 99.9% d'absorció a 7.9 GHz i amb una amplada de banda de 150.7 MHz per a valors que tenen una absorció superior al 75%.

2.6 CST: Disseny hexagonal

L'últim dels dissenys té els elements de la matriu amb forma hexagonal. Seguint les mateixes condicions que els dissenys anteriors, la Fig. 2.42 mostra l'esquema geomètric.

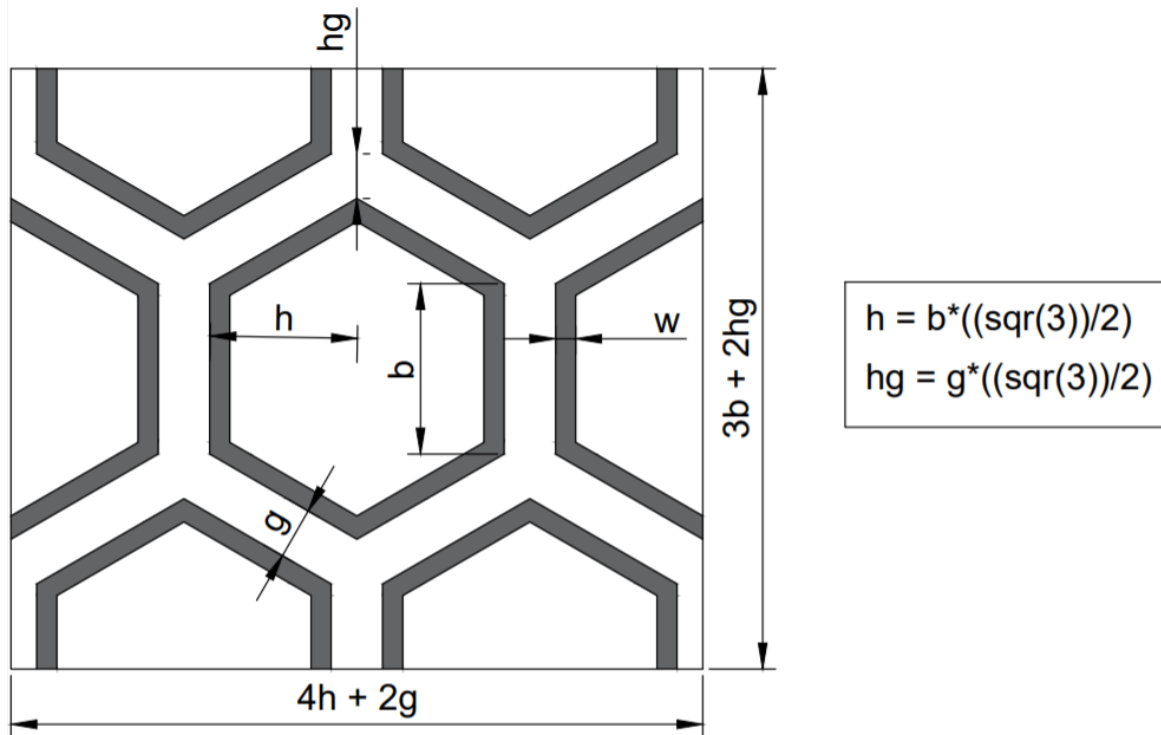


Figura 2.42: Esquema geomètric. Disseny hexàgon.

Els elements d'aquest disseny es creen definint les coordenades d'un hexàgon i posteriorment fent una extrusió d'aquest. Després es fa el mateix procés amb un hexàgon més petit a l'interior del primer, i se sostrau aquesta part de la mateixa manera que s'ha fet anteriorment amb altres dissenys.

Una vegada més s'utilitzarà l'opció **Parameter Sweep**, i en aquest cas s'estudiaran els paràmetres **b**, **w** i **g**. Una vegada més, en primer lloc es farà alguna simulació prèvia amb valors estimats d'acord amb els requeriments de freqüència per tenir un punt de partida, i posteriorment se simularan diverses seqüències canviant els valors dels paràmetres i s'aniran focalitzant en la freqüència de treball. Posteriorment, quan ja s'ha trobat una bona combinació de paràmetres, es fan les últimes simulacions per arribar a la màxima optimització.

La Fig. 2.43 i la Fig. 2.44 mostren aquestes seqüències de simulacions, mantenint inicialment $w = 1$:

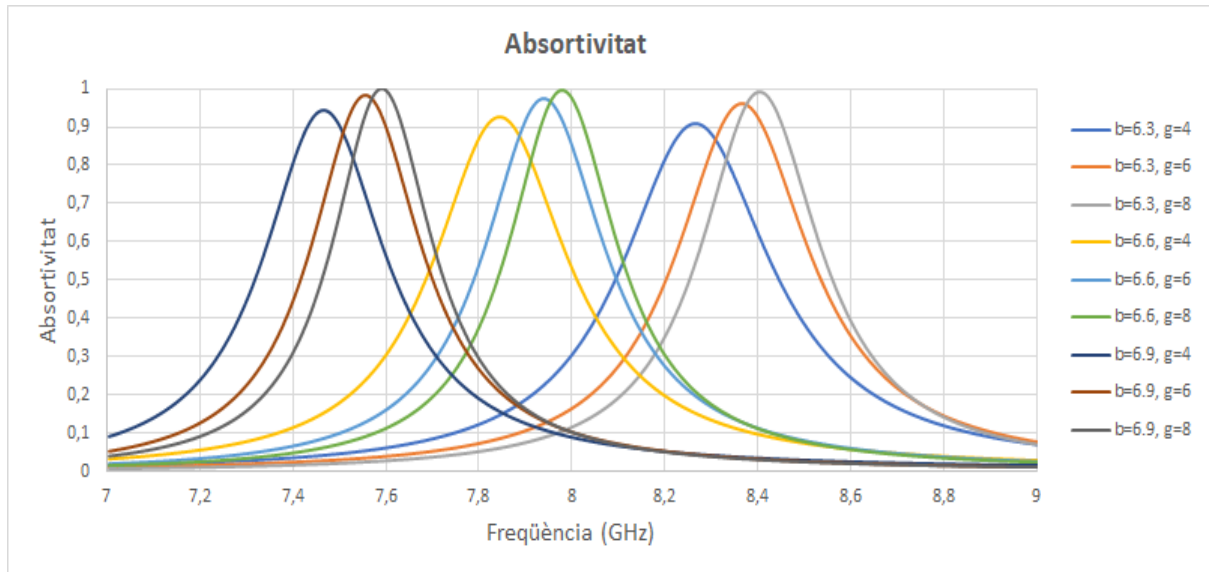


Figura 2.43: Primeres seqüències de simulacions amb $w = 1$. Disseny hexàgon.

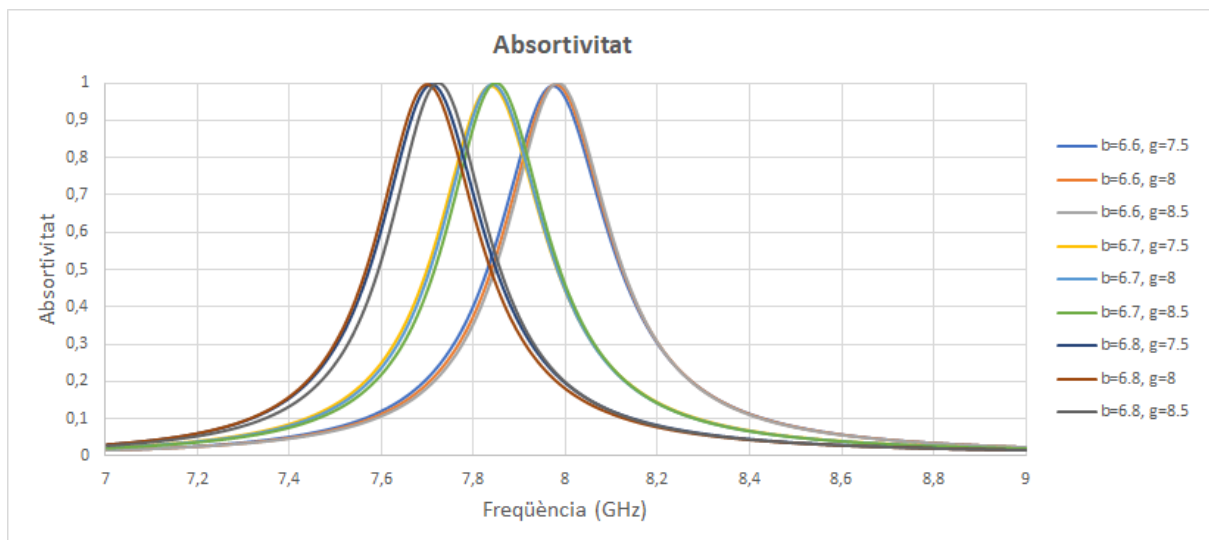


Figura 2.44: Segones seqüències de simulacions amb $w = 1$. Disseny hexàgon.

Una vegada més es repeteix el procés, aquesta vegada per a diferents valors del paràmetre w , i s'observa que els millors resultats s'obtenen per a valors al voltant de $w = 0.9$. Es fan unes últimes simulacions fent canvis molt petits en els paràmetres, buscant la màxima optimització. La Fig. 2.45 i la Taula 2.5 mostren el resultat.

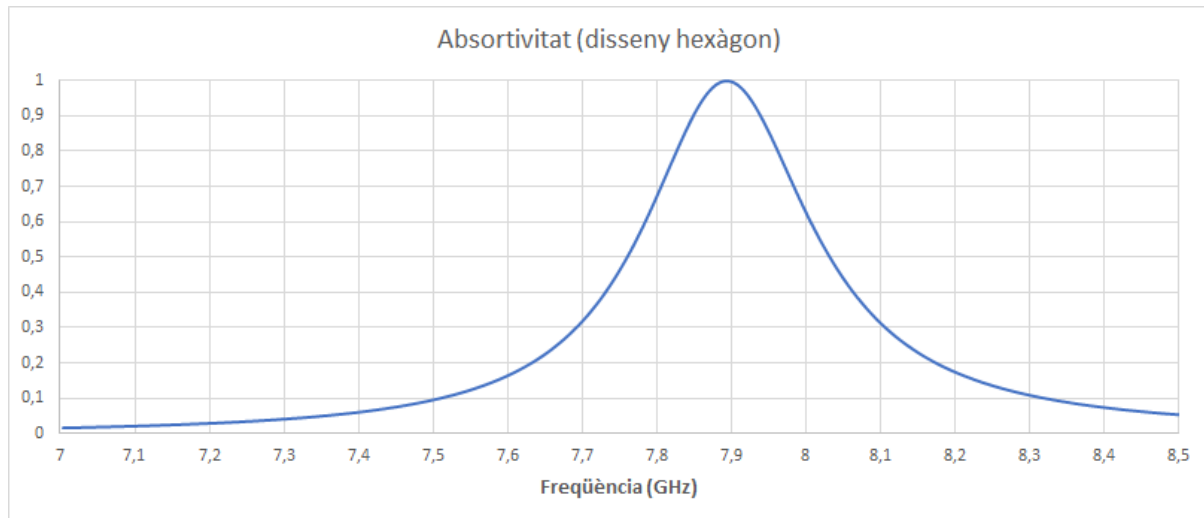


Figura 2.45: Gràfica de l'absortivitat. Disseny hexàgon. Simulació.

b	g	w	Amàx	AB (>75%)
6.6 mm	8.3 mm	0.9 mm	99.9 %	157 MHz

Taula 2.5: Dimensions geomètriques finals i resultats obtinguts. Disseny hexàgon.

Per tant, els millors resultats s'obtenen per als valors dels paràmetres que mostra la taula, assolint un 99.9% d'absorció a 7.9 GHz i amb una amplada de banda de 157 MHz per a valors que tenen una absorció superior al 75%.

3 Resultats

Una vegada optimitzats i simulats tots els dissenys, cal observar i analitzar els resultats de cada un d'ells per poder comparar-los. La Fig. 3.1 mostra una representació gràfica de l'absortivitat dels diversos dissenys, per poder comparar-los visualment.

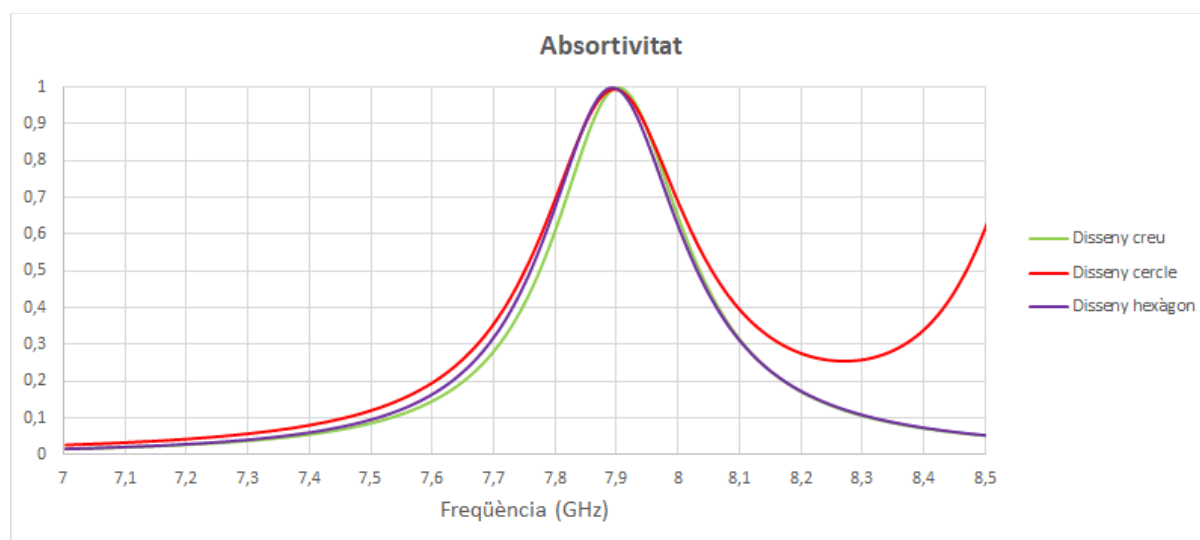


Figura 3.1: Gràfica comparativa de l'absortivitat dels diversos dissenys.

La Taula 3.1 mostra els resultats dels diversos dissenys pel que fa als aspectes que s'estudien, nivell màxim d'absortivitat a la freqüència de treball i amplada de banda. L'amplada de banda engloba el rang de freqüència amb valors d'absortivitat per sobre del 75%. També mostra les dimensions que ocupa cada una de les cel·les unitàries.

Disseny	Mètode	Freqüència	Amàx	AB (>75%)	Dimensions cel·la unitària
Cercle	Simulació	7.9 GHz	99.3 %	171.5 MHz	7.73 cm ²
Creu	Simulació	7.9 GHz	99.9 %	150.7 MHz	6.66 cm ²
Hexàgon	Simulació	7.9 GHz	99.9 %	157 MHz	13.49 cm ²

Taula 3.1: Taula comparativa dels resultats dels diversos dissenys.

4 Pressupost

La Taula 4.1 mostra el pressupost orientat a aquest estudi.

Software	Preu
Llicència CST Studio Suite	2500 €/any
Equipament	Preu
Amortització PC utilitzat	65,77 €
Hores de treball enginyer	Preu
650 hores a 8 €/hora	5200 €
Altres despeses	Preu
Consum de llum del PC	18,20 €
TOTAL	7783,97 €

Taula 4.1: Pressupost de l'estudi

Les despeses de llum s'han calculat tenint en compte que el consum de l'ordinador és de 0.2 kWh (200 W) i el preu és 0.14 €/kWh. El PC utilitzat té 16.0 GB de RAM i un processador Intel® Core™ i7-4700MQ @ 2.40 GHz, 2401MHz, 4 processadors principals i 8 processadors lògics. La seva amortització s'ha calculat tenint en compte el seu valor inicial (1050 €), el seu valor residual (200 €) i una vida útil de 5 anys.

Els 2 càlculs que s'acaben de comentar s'han basat, lògicament, en el nombre d'hores de treball (650 hores).

5 Conclusions i observacions

En aquest treball s'ha estudiat mitjançant simulació la resposta d'absorció de radiació electromagnètica en una freqüència determinada (7.9 GHz) de diverses FSS amb diversos elements en la matriu. Veient els resultats finals optimitzats s'observa que tots els dissenys es comporten d'una manera molt similar.

Els tres dissenys assoleixen un nivell d'absortivitat gairebé total per a la freqüència de treball, sent mínimament inferior l'absortivitat del disseny circular que l'absortivitat en els dissenys en creu i hexagonal (99.3 % per al disseny circular i 99.9 % per als dissenys en creu i hexagonal). D'altra banda, però, l'element circular és el que presenta una amplada de banda superior. Les diferències, però, són igualment petites (171.5 MHz d'amplada de banda per al disseny circular, 157 MHz per a l'hexagonal i 150.7 MHz per al disseny en creu). Malgrat que es tenen en compte tant l'absortivitat com l'amplada de banda, la primera ha estat el focus principal en el qual s'ha centrat aquest estudi. Per tant, en el procés d'optimització s'ha intentat sobretot assolir el màxim nivell d'absorció. Cal comentar, però, que durant les diverses proves realitzades modificant els valors dels paràmetres dels dissenys s'ha observat que, sobretot en el disseny hexagonal, es pot aconseguir una amplada de banda major a costa de rebaixar una mica el pic d'absorció i disminuint l'espai entre els elements de la matriu. A més, això evitaria la possible aparició precoç de *grating lobes*. Per tant, en un context on l'objectiu principal fos una amplada de banda el més gran possible, es podria aconseguir resultats de simulació una mica millors en aquest aspecte, encara que això comporti una disminució lleugera del nivell màxim d'absorció.

Pel que fa a les dimensions de cada una de les cel·les unitàries, veiem que la cel·la de l'element hexagonal és clarament més gran que la de l'element en creu i l'element circular. Això podria suposar un problema en aplicacions on es requereixin elements el més miniaturitzats possibles, però, de la mateixa manera que disminuir l'espai entre elements milloraria l'amplada de banda del disseny hexagonal, també es reduirien considerablement les dimensions de la cel·la unitària.

Per tant, la conclusió principal tenint en compte tot el que s'ha comentat és que tot i que els tres dissenys es comporten d'una manera molt similar, el disseny hexagonal demostra ser el que funciona millor. Assoleix un pic d'absortivitat òptim, i és capaç d'obtenir una amplada de banda superior als altres dissenys si això és el que es busca. Com a inconvenient, aquest disseny és lleugerament més difícil de controlar que els altres dos, així que també val la pena tenir en compte els altres dissenys per a aplicacions que requereixin senzillesa.

Val a dir, també, que els resultats obtinguts són fins a cert punt orientatius per a una aplicació a casos reals, ja que les simulacions es donen en unes condicions ideals i establertes prèviament. El següent pas seria implementar físicament aquests dissenys i provar-los, ja que en la realitat poden intervenir multitud de factors que no es donen les simulacions i que poden fer variar lleugerament els resultats. De totes maneres, les simulacions estan pensades per apropar-se el màxim possible a un cas real, per la qual cosa els resultats obtinguts en el procés de simulació són de gran valor per a propers passos.

Per acabar, durant tot aquest treball s'ha demostrat que és possible fer servir teixits apantallants a base de FSS per a protegir la salut humana. Queda vist que es pot obtenir una gran resposta pel que fa a l'absorció de radiació electromagnètica. Cal seguir treballant molt al respecte, però és evident que aquest és un gran camí per reduir l'impacte de la radiació electromagnètica en el cos humà.

5.1 Treballs futurs

El següent pas lògic seria la fabricació del teixit i la mesura d'aquest. És a dir, la simulació proporciona un molt bon punt de partida, però el següent pas ha de ser provar el teixit en condicions reals i comprovar si els resultats són igualment bons.

A part d'això, també seria interessant provar altres materials, per exemple altres teles no conductores per al substrat, com el cotó, la seda o el cuir. A més, també es poden provar altres topologies d'elements de la matriu o combinar diversos elements entre ells per intentar obtenir resultats òptims. Les possibilitats són nombroses, i val la pena seguir treballant en aquest aspecte en l'àmbit teòric i pràctic.

En l'aspecte ambiental, està clar que fer els dissenys i les simulacions no suposa cap efecte ambiental a tenir en compte. Però això canvia quan es tracta del següent pas, és a dir, la fabricació del teixit. Per a la fabricació i altres passos futurs cal tenir en compte que no tots els materials es poden reciclar fàcilment. El cotó, per exemple, esdevé una possibilitat molt interessant en aquest aspecte, ja que és fàcilment reciclable, al contrari que alguns polímers.

Per al comportament i les aplicacions de les FSS en general, a la secció 2.1.3.8 s'han analitzat algunes de les principals qüestions a millorar, en les quals és molt probable que es treballi força durant els pròxims anys.

6 Bibliografía

- [1] Feyyaz Ozdemir and Aysegul Kargi (2011). Electromagnetic Waves and Human Health, Electromagnetic Waves, Prof. Vitaliy Zhurbenko (Ed.), ISBN: 978-953-307-304-0, InTech, Disponible a: <https://www.intechopen.com/books/electromagnetic-waves/electromagnetic-waves-and-human-health>. Últim accés: 20/06/2020.
- [2] Organización Mundial de la Salud. Campos electromagnéticos (CEM). Disponible a: <https://www.who.int/peh-emf/about/WhatIsEMF/es/index1.html>. Últim accés: 20/06/2020.
- [3] National Research Council (US) Committee on Assessment of the Possible Health Effects of Ground Wave Emergency Network (GWEN). (1993). *Assessment of the Possible Health Effects of Ground Wave Emergency Network*. National Academies Press (US).
- [4] Mattsson, Mats-Olof & Ahlbom, Anders & Bridges, J & Seze, R & Hillert, Lena & Juutilainen, J & Neubauer, Georg & Schüz, J & Simko, Myrtil. (2007). Possible effects of Electromagnetic Fields (EMF) on Human Health.
- [5] Scientific Committee on Emerging Newly Identified Health Risks. Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics*. 2015;36(6):480-484.
- [6] Organización Mundial de la Salud. Campos eléctricos y magnéticos estáticos. Disponible a: <https://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs299/es/>. Últim accés: 20/06/2020.
- [7] Organización Mundial de la Salud. Exposición a campos de frecuencia extremadamente baja. Disponible a: <https://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs322/es/>. Últim accés: 20/06/2020.
- [8] Singh, S., Kapoor, N., 2014. Health implications of electromagnetic fields, mechanisms of action, and research needs. *Adv. Biol.* 2014 (2014), 24.
- [9] AIMME: Unidad de Materiales y Tratamientos Superficiales. *Aproximación a los metamateriales: Aproximación a tecnologías emergentes*, Febrer 2011.
- [10] Singh, G., Ni, R., & Marwaha, A. (2015). A Review of Metamaterials and its Applications. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 19, 305-310.
- [11] Buriak, I.A., Zhurba, V.O., Vorobjov, G., Kulizhko, V.R., Kononov, O., & Rybalko, O.O. (2016). Metamaterials: Theory, Classification and Application Strategies (Review). *Journal of Nano-and electronic Physics*, 8, 04088-1-04088-11.
- [12] Palomino Ovando, M., & Coccoletzi, G. (1). La refracción negativa y los metamateriales: los nuevos materiales para dispositivos ópticos. *Mundo nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias Y Nanotecnología*, 1(1), Novembre 2008.

- [13] Rakesh Kshetrimayum. A brief intro to metamaterials. *IEEE Potentials*, 5(23):44–46, 2005.
- [14] Lavoie, Benjamin R., Patrick M. Leung, and Barry C. Sanders. “Low-Loss Surface Modes and Lossy Hybrid Modes in Metamaterial Waveguides.” *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications* 10.4 (2012): 602–614.
- [15] Wu Te-Kao. Frequency selective surfaces. *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, 10.1002/0471654507.eme133, 2005.
- [16] Rana Sadaf Anwar et al. Frequency selective surfaces: A review. *Applied Sciences*, 8(9), 2018.
- [17] Pioneering 21st Century Electromagnetics and Photonics. Lecture 20: Frequency selective surfaces and metasurfaces. Disponible a: <https://empossible.net/academics/emp6303/>. Últim accés: 20/06/2020.
- [18] Ben A. Munk. *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, volume 29. John Wiley & Sons, Inc. Wiley Online Library: Hoboken, NJ, USA, 2000.
- [19] J. Lorenzo, A. Lázaro, R. Villarino and D. Girbau, "Modulated Frequency Selective Surfaces for Wearable RFID and Sensor Applications," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 10, pp. 4447-4456, Oct. 2016.
- [20] Jinpil Tak and Jaehoon Choi. A wearable metamaterial microwave absorber. *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, 16:784–787, 2017.
- [21] Yang, S., Liu, P., Yang, M. et al. From Flexible and Stretchable Meta-Atom to Metamaterial: A Wearable Microwave Meta-Skin with Tunable Frequency Selective and Cloaking Effects. *Sci Rep* 6, 21921 (2016).
- [22] H. A. Smith, M. Rebbert, and O. Sternberg, “Designer infrared filters using stacked metal lattices,” *Appl. Phys. Lett.* 82, 3605–3607 (2003).
- [23] Bossard, J.A.; Werner, D.H.; Mayer, T.S.; Smith, J.A.; Tang, Y.U.; Drupp, R.P.; Li, L. The design and fabrication of planar multiband metallodielectric frequency selective surfaces for infrared applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2006, 54, 1265–1276.
- [24] Govindaswamy, S.; East, J.; Terry, F.; Topsakal, E.; Volakis, J.L.; Haddad, G.I. Frequency-selective surface based bandpass filters in the near-infrared region. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2004, 41, 266–269.
- [25] Werner, D.H.; Mayer, T.S.; Baleine, C.R. Multi-Spectral Filters, Mirrors and Anti-Reflective Coatings with Subwavelength Periodic Features for Optical Devices. U.S. Patent Application No. 12/900,967, 14 Abril 2011.

- [26] Rohde & Schwarz. The world between 3 GHz and 300 GHz: services and applications. Disponible a: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_news_from_rs/199/N199_70-75_services-and-applications-3GHz-300GHz_e.pdf. Últim accés: 20/06/2020.
- [27] Lin, J. C. Human Exposure to Rf, Microwave, and MillimeterWave Electromagnetic Radiation [Health Effects]. *IEEE Microwave Magazine* 2016, 17, 32–36.
- [28] Bilotti, Filiberto & Sevgi, Levent. (2012). Metamaterials: Definitions, properties, applications, and FDTD-based modeling and simulation (Invited paper). *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 22. 422-438.
- [29] Monti, A.; Bilotti, F.; Toscano, A.; Vegni, L. Possible implementation of epsilon-near-zero metamaterials working at optical frequencies. *Opt. Commun.* 2012, 285, 3412–3418.
- [30] Di Falco, A.; Zhao, Y.; Alú, A. Optical metasurfaces with robust angular response on flexible substrates. *Appl. Phys. Lett.* 2011, 99, 163110.
- [31] C. Saeidi and D. van der Weide, "Nanoparticle array based optical frequency selective surfaces: theory and design," *Opt. Express*. 21, 16170-16180 (2013).
- [32] CST GmbH—Computer Simulation Technology. Fss help - home - tutorials and examples - fss: Simulation of resonator array.